

高分一号山地冰川运动速度提取与分析

周建民¹, 张鑫^{1,2}, 刘志平², 李震¹

1. 中国科学院空天信息创新研究院 中科院数字地球重点实验室, 北京 100094;

2. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 徐州 221116

摘要: 近年来国产遥感卫星数据增多, 但在山地冰川运动速度监测研究中, 国产卫星遥感数据的使用却很少。基于此现状, 本研究利用“高分一号”卫星数据 (GF-1) 对藏东南雅弄冰川运动速度进行了提取。通过与同分辨率、同时段的 Landsat 8 数据进行对比, 以及利用非冰川稳定区域的残余位移和冰川主冰流线剖面运动速度两方面, 评估了 GF-1 数据提取的冰川运动速度的精度。结果表明: GF-1 数据在非冰川稳定区域的平均偏移量为 $7.48 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 虽较 Landsat 8 数据的高 (平均偏移量 $4.58 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$), 但小于冰川平均运动速度的 5%; GF-1 数据与 Landsat 8 数据在 2015 年—2016 年时段内的冰川主冰流线运动速度变化趋势一致, 两者的偏差均方根为 7.41 m , 小于冰川平均运动速度的 5%。研究结果证明了国产高分一号卫星遥感数据在青藏高原山地冰川运动速度监测应用中的可行性。

关键词: 高分一号卫星, 国产卫星数据, 山地冰川, 雅弄冰川, 运动速度, 归一化互相关

引用格式: 周建民, 张鑫, 刘志平, 李震. 2021. 高分一号山地冰川运动速度提取与分析. 遥感学报, 25(2): 530–538

Zhou J M, Zhang X, Liu Z P and Li Z. 2021. Extraction and analysis of mountain glacier movement from GF-1 satellite data. National Remote Sensing Bulletin, 25(2): 530–538 [DOI: 10.11834/jrs.20219080]

1 引言

山地冰川是西北干旱区重要的淡水资源, 是环境变化和气候变暖的敏感指示器, 冰川的变化信息能够反映全球气候的变化特征 (Bolch 等, 2012; Yao 等, 2012)。山地冰川主要分布在中、低纬度的高山地带, 与极地冰川相比, 它们对于气候的变化更加敏感, 因此研究山地冰川的变化现状对区域乃至全球性气候变化研究都具有重要意义 (Jiang 等, 2012; 丁光熙 等, 2014; 叶庆华 等, 2007; 张晓博 等, 2018)。冰川运动速度监测是监测冰川动态变化的重要手段, 其不仅能反映冰川的动态变化信息, 为冰川动力学研究提供重要参数, 同时也是冰川堰塞湖溃决研究等相关灾害模型和预测的重要输入参数, 也可为由冰川运动引发的冰川灾害预警提供重要的数据支撑 (王坤 等, 2014; Mayr 等, 2014)。

冰川运动速度的观测方法主要包括: 传统观

测方法 (花杆测量法) 和遥感监测得方法 (SAR 干涉测量法 (InSAR)、互相关法等) 等。传统观测方法相较于其他的监测方法而言, 测量精度最高, 但由于冰川大多处于人迹罕至的区域, 传统方法很满足大区域、周期性监测的需求 (井哲帆 等, 2002); 遥感监测的方法由于其高覆盖度等方面的特点, 在山地冰川和极地冰川中得到了广泛的应用 (Zhou 等, 2014a; 周建民 等, 2009; Zhou 等, 2011, 2014b), 遥感方法中的 SAR 干涉监测的方法, 由于要求干涉 SAR 数据对之间需具有高相干性才可以有效应用。因此, 该方法常常受制于 SAR 干涉数据对的时间和空间失相干的影响, 并且该方法在反演冰川运动速度时利用 SAR 干涉对覆盖期间的数据估算冰川全年的运动速度, 因此会存在较大的误差; 相比较而言, 遥感方法中基于光学遥感数据的互相关法具有覆盖区域大、数据源较多, 受地形影响小等优点。因此可以用于长时间间隔的冰川运动速度的提取与分析 (许

收稿日期: 2019-03-27; 预印本: 2019-10-13

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42071084, 41571061, 41471066); 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (编号: XDA19070202); 国家重点研发计划 (编号: 2016YFB0501501, 2016YFA0600304)

第一作者简介: 周建民, 1978 年生, 男, 副研究员, 研究方向为冰川遥感及全球变化遥感的理论和应用。E-mail: zhoujm@radi.ac.cn

通信作者简介: 张鑫, 1993 年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为冰川变化及雷达遥感应用。E-mail: 13952114109@163.com

君利等, 2011)。该方法在山地冰川以及南极和格陵兰岛地区的冰川运动监测中得到了广泛的应用 (Scambos 等, 1992; Whillans 等, 1993; Rolstad 等, 1997; 黄磊和李震, 2009; 郑茜等, 2016)。

目前, 基于光学遥感数据的互相关法进行山地冰川运动速度监测的研究中, 采用的遥感数据绝大多数为国外的遥感数据 (如: Landsat 8、ASTER、SPOT、Sentinel-2 等光学遥感数据) (李成秀等, 2013; Rosenau 等, 2015; Käab 等, 2016)。而国产卫星数据较少涉及。中国的高分系列卫星遥感数据自从 2013-04 成功发射第一颗开始, 已经构成了中国陆地资源调查监测业务较为完整的卫星星座, 实现了中国高分系列卫星高分辨率、高重访周期的对地观测能力, 能满足快速、机动的监测需求, 能很好的服务于中国资源调查等领域的相关应用 (蒙诗栋等, 2019; 王中挺等, 2015)。因此, 本文将利用 2013 年—2017 年冰川冬季时段内的 5 期 GF-1 WFV 光学遥感数据对雅弄冰川的运动速度信息进行提取, 并利用非冰川区域的残余位移量和 Landsat 8 数据在 2015 年—2016 年时段内获取的运动速度对 GF-1 数据进行精度验证, 以证明国产 GF-1 数据在山地冰川运动速度监测应用中的可行性和准确性。

2 试验区 and 数据

2.1 试验区概况

雅弄冰川位于青藏高原的东南部, 其中心经纬度为 96°43' E, 29°21' N。该冰川区的主峰岗日嘎布山海拔 6606 m, 周围发育了近 1320 条现代冰川, 雅弄冰川位于然乌错流域, 长约 26 km, 宽度为 2—4 km, 面积为 191.4 km² (图 1)。受海洋性季风气候的影响, 冰川的积累和消融速度都较快, 该区域的年降水量为 1000—3000 mm, 冰川的平衡线较低, 运动速度快 (刘时银等, 2005)。

2.2 数据

本文采用的 GF-1 WFV 1A 级光学遥感数据信息如表 1 所示。GF-1 1A 级产品数据具有层次分明、覆盖区域大、分辨率适中等特点 (白照广, 2013), 可为冰川变化监测提供有效的数据源。考虑到青藏高原东南部夏季云雨天气较多, 为了保证冰川区不受云雨天气的影响, 选择的数据成像时间都集中在冬季。

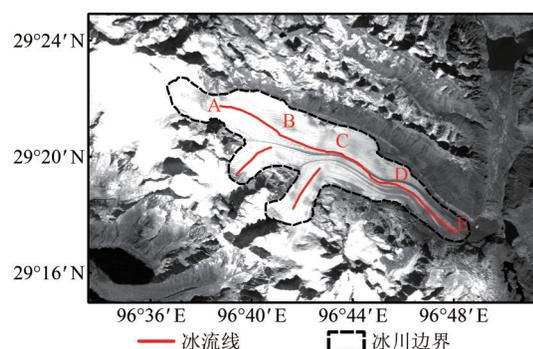


图 1 雅弄冰川位置图 (底图为 GF-1 WFV b4 波段影像)
Fig. 1 Map (based on GF-1 WFV band 4 image in UTM projection) showing the location of the Yanong glacier

表 1 研究所用数据 (波段 4)

Table 1 Data used in this study (band 4)

时段	Pre-event Image	Post-event Image	传感器	Path/ Row	成像 间隔/d	分辨 率/m
1	2013-12-04	2014-11-08	WFV1	30/108	339	16
2	2014-11-08	2015-11-25	WFV3	30/108	382	16
3	2015-11-25	2016-11-24	WFV3	30/108	365	16
4	2016-11-24	2017-12-06	WFV3	30/108	377	16

3 技术方法和数据处理

3.1 归一化互相关算法

利用事先设置的窗口在搜索图像中移动, 计算参考图像和搜索图像相关性最大的像元单元格, 从而估算出冰川的运动速度信息。假设两景影像中的一景为参考影像 i_1 , 另一景为搜索影像为 i_2 , 两景遥感数据获取时间间隔内的冰川位移量 (Δx , Δy) 为 (孔繁司等, 2016):

$$i_2(x, y) = i_1(x - \Delta x, y - \Delta y) \quad (1)$$

为了提高冰川运动信息的提取精度, 在频率域下对式 (1) 进行傅里叶变换为:

$$I_2(w_x, w_y) = I_1(w_x, w_y) e^{-j(w_x \Delta x, w_y \Delta y)} \quad (2)$$

式中, I_1 、 I_2 分别为参考影像 i_1 和搜索影像 i_2 的傅里叶频谱影像。 w_x 、 w_y 分别为频谱在行方向和列方向上的变化量, 考虑到归一化形式的可靠性, 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:

$$C_{i_1 i_2} = e^{j(w_x \Delta x, w_y \Delta y)} = \frac{I_1(w_x, w_y) I_2^*(w_x, w_y)}{|I_1(w_x, w_y) I_2^*(w_x, w_y)|} \quad (3)$$

式中, * 表示共轭复数, $C_{i_1 i_2}$ 为归一化互功率谱, 对其做傅里叶逆变换后可得

$$F^{-1}\left(e^{j(w_x \Delta x + w_y \Delta y)}\right) = \delta(x + \Delta x, y + \Delta y) \quad (4)$$

对式 (4) 取二维脉冲函数的峰值点即可得到两幅影像在冰川表面的位移量 $(\Delta x, \Delta y)$ 。

3.2 数据处理

按照第 3.1 节所述的方法计算雅弄冰川在 2013 年—2017 年间的运动速度信息, 主要步骤包

括: 冰川表面位移量计算和平均运动速度计算两大部分。位移量计算采用归一化互相关算法, 通过 COSI-Corr 软件在傅里叶域对 GF-1 遥感图像进行反复迭代和无偏估计。该方法在图像质量较好的情况下能达到亚像素级的影像相关精度 (Leprince 等, 2007); 运动速度计算利用冰川在东西向、南北向的位移信息和遥感数据获取的时间间隔计算年平均运动速度, 并利用冰川表面的冰流矢量和信噪比图对冰面的运动速度结果进行后处理, 数据处理的详细流程如图 2 所示。

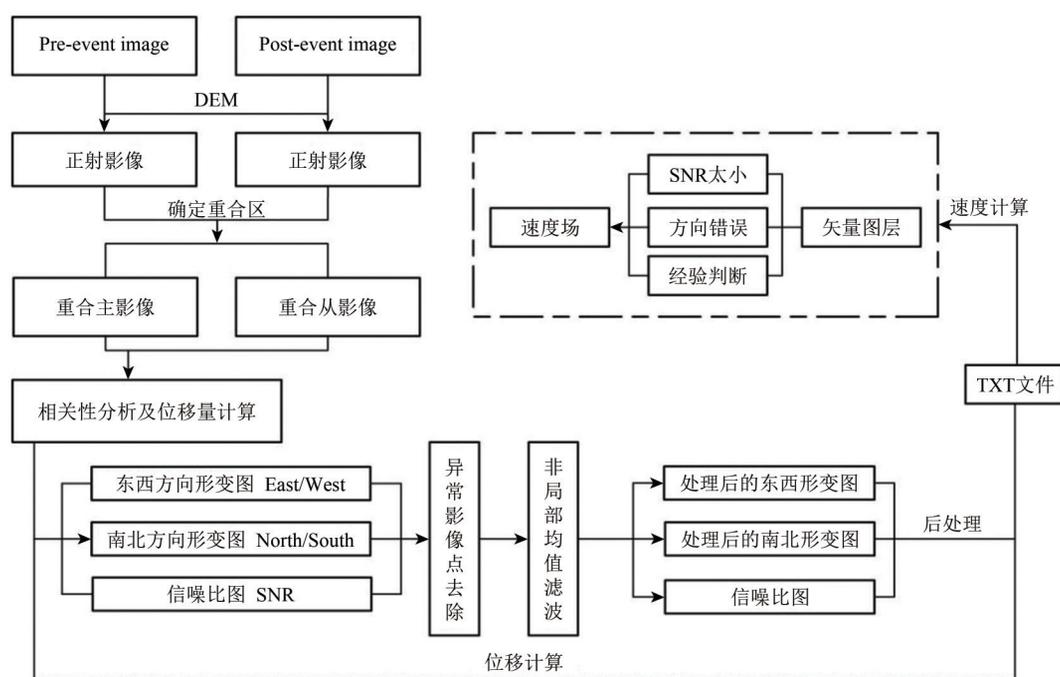


图 2 运动速度提取流程图

Fig. 2 Processing flow of the applied method for deriving glacier surface flow velocities

(1) 图像配准。以 Landsat 8 L1T 全色波段影像数据作为参考图像进行控制点的选取 (图 3), 利用 RPC 数据和 SRTM DEM 数据对影像进行正射校正。经过这一步处理, 配准精度只能到达影像直接对地目标定位的精度 (约为 20 m), 为了获得更高的配准精度还需要增加地面控制点对 RPC 参数进行精化以满足测图应用需要。最后再进行图像的精确配准 (靳海亮 等, 2017), 使不同时段内的 GF-1 影像数据均具有良好的正射校正和配准精度 (图 4, 表 2)。

(2) 图像间的相关性分析。在进行图像间的相关性分析和位移分量提取时, 需设置合理的窗口大小。理论上初始窗口应大于 X 或 Y 方向上最大位移量的 2 倍, 在实际运用中, 推荐使用更大的窗

口以获取更好的计算结果 (Ayoub 等, 2009)。由于雅弄冰川区受海洋性季风气候的影响, 冰川表面消融强烈, 运动速度快, 冰川主冰流线上的最大位移可达 $250 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ (约为 15 个像素), 因此, 本文将初始搜索窗口设置为 128×128 , 计算冰川像素级精度的相对位移量; 将窗口设置为 32×32 , 计算亚像素级的位移量, 并设置步长为 4 的窗口间隔和 0.8 的掩模阈值, 进而得到冰川位移分量 (东西向和南北向) 和评估位移计算精度的信噪比。

(3) 冰川位移计算。利用相关分析过程中获取的位移分量数据进行波段计算, 得到冰川位移分布信息。由于受不同时相遥感数据时空去相关、云层覆盖和阴影的影响, 部分位移值不能真实的反映冰川表面的真实运动, 因此需要对计算的冰

川位移结果进行后处理。将位移分量数据导出并生成矢量图层（图5），剔除云、阴影覆盖部分以及与冰川主流线方向偏差超过20°的部分（Scherler等，2008），即可得到正确的冰川表面位移信息（图6）。

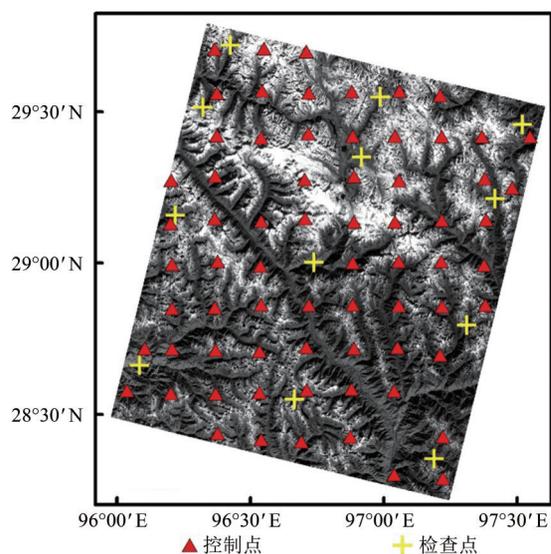


图3 控制点和检查点的分布
Fig. 3 Distribution of checkpoints and control points

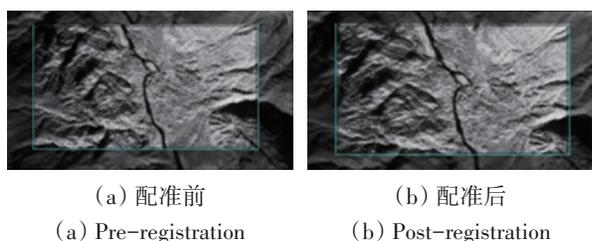


图4 配准前与配准后的偏移对比图
Fig. 4 Pre-registration and post-registration comparison chart

表2 GF-1 WFV 影像的配准结果
Table 2 Statistical registration accuracy of GF-1 WFV in four time periods

序号	时段/年	检查点数量/个	最大误差/m	最小误差/m	精度(中误差)/m
1	2013—2014	12	21.6	1.44	12.16
2	2014—2015	12	17.6	2.72	12.48
3	2015—2016	12	18.4	2.08	10.88
4	2016—2017	12	19.2	1.12	11.08

(4) 年平均运动速度计算。由于本文所采用的遥感数据的成像时间间隔不是完整的一年，因此上述获取的运动速度并不能代表年平均运动速度。为了获取冰川的年平均运动速度，需用式(5)进行速度转换（许君利等，2011）。

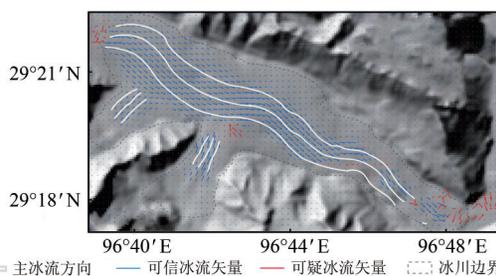


图5 2015-12-09—2016-12-11时段雅弄冰川区冰流矢量分布图

Fig. 5 Velocity vector of the Yanong Glacier in the period of 2015-12-09—2016-12-11

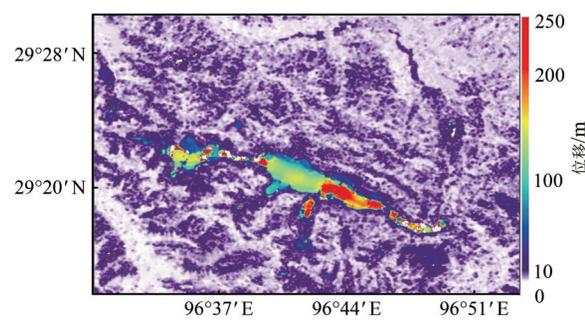


图6 2015-12-09—2016-12-11时段内研究区位移信息分布图

Fig. 6 The displacement map in Yanong Glacier in the period of 2015-12-09—2016-12-11

$$V_{yr} = V_s \times 153 + A \times V_s \times 212 \quad (5)$$

式中， V_{yr} 为冰川年平均运动速度； A 为冬季日平均运动速度与夏季日平均运动速度的比率。153为夏季总天数（5月—9月）；212为冬季总天数； V_s 为夏季日平均运动速度，可由遥感数据计算的位移推算出

$$V_s \times Day_s + A \times V_s \times Day_w = D \quad (6)$$

式中， D 为两期影像计算出的位移量； Day_s 为两期影像时间段内夏季天数； Day_w 为两期影像时间段内冬季天数。下表为4组影像间的夏季、冬季天数情况。

表3 4组影像夏季、冬季以及总天数统计

Table 3 Days in summer, winter and whole year of images in four time periods

期数	时段区间	夏季天数/d	冬季天数/d	总天数/d
1	2013-12-04—2014-11-08	153	186	339
2	2014-11-08—2015-11-25	153	229	382
3	2015-11-25—2016-11-24	153	212	365
4	2016-11-24—2017-12-06	153	224	377

4 结果与分析

利用雅弄冰川区2013年—2017年间的5景GF-1

WFV 遥感数据, 采用归一化互相关算法提取冰川在 4 个时段内的位移量, 并结合成像的时间间隔, 将

所有时段的位移量转换为年平均运动速度 (图 7)。

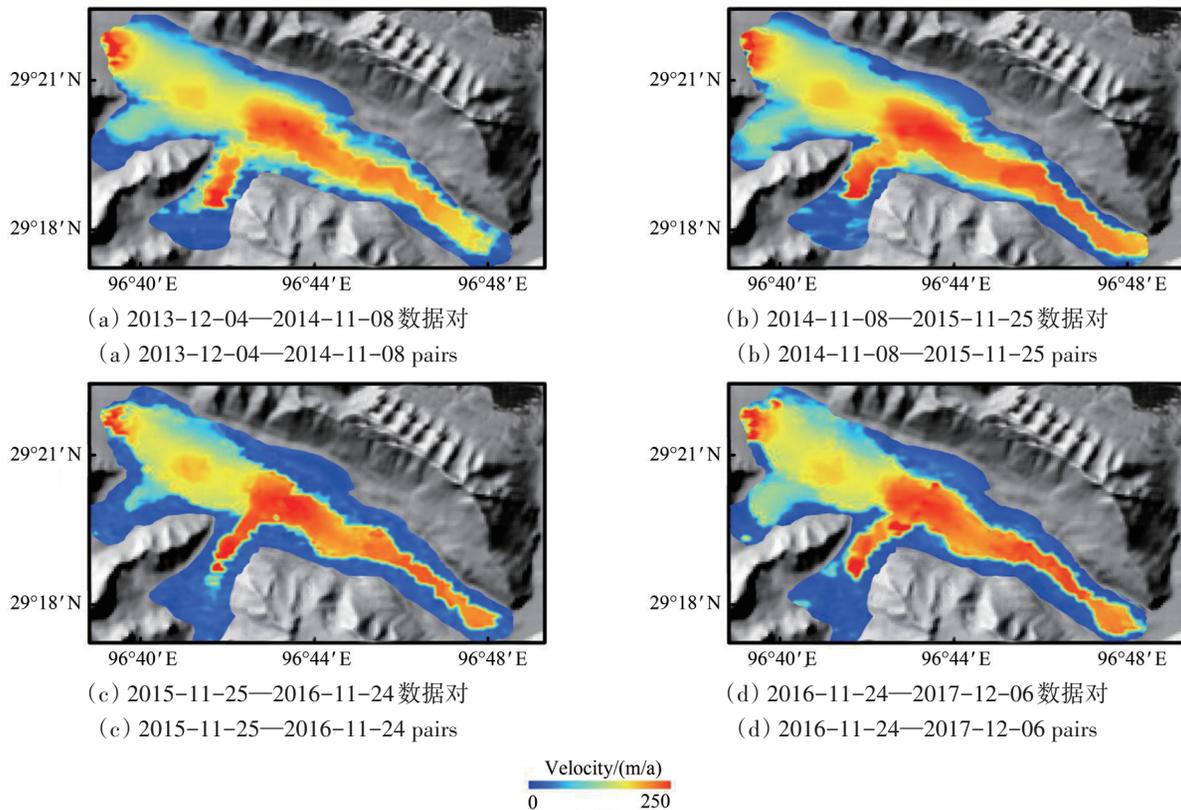


图 7 雅弄冰川在 2013 年—2017 年间不同时段下的运动速度分布

Fig. 7 Distribution of flow velocity on Yanong Glacier in different periods during 2013 and 2017

由不同时段内雅弄冰川的运动速度分布图 (图 7) 可看出, 2013—2014 时段内 (图 7 (a)), A 点处 (图 1, 海拔 4700 m) 的运动速度最大为 $240 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 冰川主冰流的运动速度介于 $100\text{—}240 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均运动速度 $153.81 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。冰川由 A 点到 B 点 (图 1, 海拔 4600 m), 运动速度逐渐减弱, 最小减至 $130 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 而在靠近 B 点区域, 由于受到支流冰川汇入的影响, 冰川运动速度又呈现出加快的趋势, 最大运动速度为 $150 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。由 B 至 C 点 (图 1, 海拔 4500 m) 冰川运动速度先减小后增大至 $190 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$; 而在 2014—2015 时段内 (图 7 (b)), A 点处的运动速度最大为 $220 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 冰川主冰流的运动速度介于 $100\text{—}220 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均运动速度 $157.16 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$; 在 2015—2016 (图 7 (c)) 和 2016—2017 这两个时段内 (图 7 (d)), A 点处的最大运动速度分别为 $200 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $198 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 冰川主冰流运动速度分别介于 $100\text{—}200 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $100\text{—}198 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均运动速度分别为 $147.10 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $142.78 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。综上, 发现在 2013 年—2017 年

的 4 个时段内, 冰川主冰流的运动速度基本介于 $100\text{—}240 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均运动速度 $150 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

为进一步分析藏东南雅弄冰川的运动速度特征, 本文还对 4 个时段内沿冰川主冰流线的运动速度结果进行了分析 (图 8), 分析结果表明冰川具有如下的运动特征:

(1) 4 个时段的年平均运动速度大致相同, 平均值为 $150 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。说明该冰川的表面运动速度在 2013 年—2017 年间整体呈现平稳趋势。

(2) 沿图 1 所示的主冰流线, 雅弄冰川在 2013 年—2016 年的 3 个时段内的运动速度整体上变化不大, 但在 2016 年—2017 年间运动速度有减缓的趋势。这可能与该区域的气候变化有关。

(3) 4 个时段冰川的运动速度都是在 A 点都达到最大值, 随着冰川表面海拔高度的降低, 冰川运动速度呈逐渐减小的趋势。在 B 点和 C 点, 由于受支流冰川汇入的影响, 冰川运动速度有所增加。在 D 点处由于受冰川表面坡度变化的影响, 4 个时段的冰川运动速度出现了明显的分化。在冰川末

端的E点处，由于受到上游冰川运动产生的惯性作用，在表碛物覆盖区域也存在明显的冰流运动。

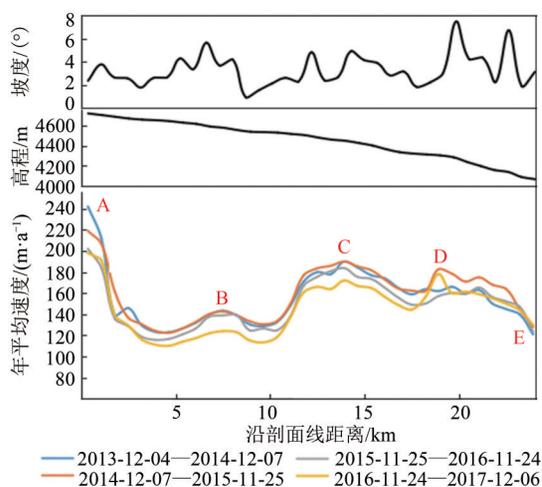


图8 雅弄冰川沿其主冰流线在不同时段内的运动速度曲线

Fig. 8 The curves of flow velocity along the longitudinal profile of the Yanong Glacier in four durations

5 精度分析

由于受山地冰川特殊的地理位置和恶劣的自然条件限制，很难开展野外实地验证工作。本文选择的冰川实验区也没有相应的冰面实测数据对结果进行验证。因此，为了对本文的结果进行精度验证，首先我们将Landsat 8 L1T数据提取的冰川运动速度作为真值对本文的结果进行了验证和对比分析(Heid和Kääb, 2012; Dehecq等, 2015)。Landsat系列卫星自1972年发射以来，提供了大量连续、覆盖范围广且分辨率适中的对地观测数据，被广泛应用于山地冰川运动速度的提取研究，用其提取的冰川运动速度结果具有很高的精度(Zheng等, 2016; 孙永玲等, 2016)，可为GF-1数据提取的运动速度结果的精度验证提供可靠的参考。选取成像于2015-12-09和2016-12-11的两景Landsat 8 L1T影像数据，按照上述的数据处理流程提取了2015年—2016年间的冰川运动速度。通过对比Landsat 8数据与GF-1数据沿冰川主冰流线的运动速度(图9)，发现两种结果的冰川运动速度的变化趋势具有很好的一致性，同时还统计了两个结果的差值曲线，其最大偏差值为14.95 m，平均偏差为7.42 m，偏差均方根为7.41 m，小于冰川年运动量的5%。

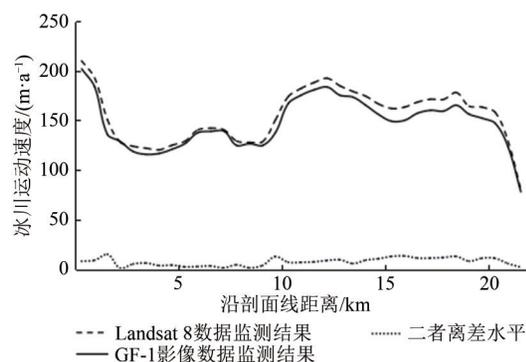


图9 2015年—2016年雅弄冰川Landsat 8与GF-1数据沿主流线运动速度对比图

Fig. 9 The curves of flow velocity along the longitudinal profile in Fig.1 derived from Landsat 8 and GF-1 in the period of 2015—2016

为了进一步验证GF-1数据提取的冰川运动结果的准确性，本文还利用冰川区周围非冰川稳定区域的残余偏移量来定量的评估冰川运动速度的精度(Bolch等, 2011; Koblet等, 2010)。其详细公式如下：

$$e_{\text{off}} = \sqrt{\text{MED}^2 + \text{SE}^2} \quad (7)$$

式中， e_{off} 为非冰川稳定区偏移量的误差；MED为非冰川稳定区偏移量的平均值；SE为非冰川稳定区偏移量的标准误差，其具体计算公式如下：

$$\text{SE} = \frac{\text{STDV}}{\sqrt{N_{\text{eff}}}} \quad (8)$$

式中，STDV为非冰川稳定区偏移量平均值的标准差； N_{eff} 为空间非相关像元个数，其计算公式如下：

$$N_{\text{eff}} = \frac{N_{\text{total}} \times \text{PS}}{2D} \quad (9)$$

式中， N_{total} 为非冰川区像元总数；PS为像元分辨率； D 为空间相关最大距离。空间相关最大距离一般是像元分辨率的20倍。

按照式(7)一式(9)，GF-1影像数据和Landsat 8影像数据不同时段内在同一非冰川稳定区的残余偏移量，如图10所示，并统计了两者在非冰川稳定区域的偏移量(表4)。结果表明：GF-1影像数据在2013年—2017年4个时段内的非冰川稳定区域偏移量均虽较Landsat 8数据的大，最大偏差为3.86 m，最小偏差为2.14 m，平均偏差为2.91 m，但均小于冰川实际年平均运动量的5%，由此可证明基于GF-1数据提取的冰川运动速度精度虽比Landsat 8数据提取的结果略差，但完全满足山地冰川运动速度提取的精度要求。

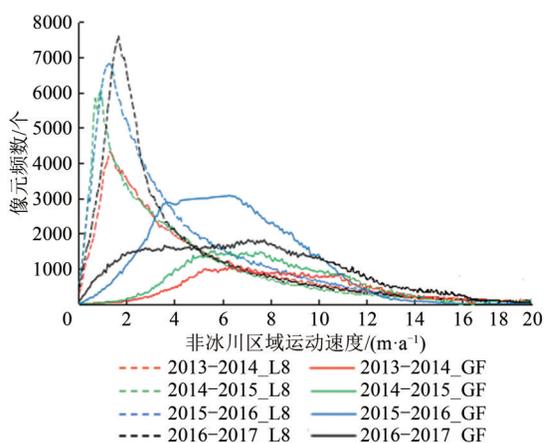


图 10 不同时段下非冰川区域残余运动频率分布
Fig. 10 The frequency distribution of residual velocity in non-glacierized regions derived from Landsat 8 and GF-1 at different periods

表 4 非冰川稳定区域运动速度统计结果

Table 4 Statistics of the velocity in non-glacierized region

监测时段/年	GF-1 数据非冰川 稳定区域偏移量 $e_{off}/(m \cdot a^{-1})$	Landsat 8 数据非冰川 稳定区域偏移量 $e_{off}/(m \cdot a^{-1})$
2013—2014	7.65	4.92
2014—2015	8.25	4.39
2015—2016	6.77	4.63
2016—2017	7.25	4.36

6 结论

利用藏东南雅弄冰川区 2013 年—2017 年的 5 景 GF-1 WFV 光学遥感数据, 采用归一化互相关算法提取了冰川区的运动速度, 并对该冰川的运动速度结果进行了精度验证和运动特征分析。结果表明, (1) 当选取的 GF-1 卫星数据的时间间隔较长时, 受时间失相关的影响, 会使得匹配点的位移和纹理特征变化较大, 易在互相关分析中出现误匹配, 从而引入错误的运动信息; (2) 由于本文中选取的数据成像时间集中在冬季, 冰面上积雪较多, 特别在海拔 4700 m 以上的区域, 受积雪区高反射特性的影响, 使得该区域为亮白色 (图 1), 因此很难获取两景影像之间的同名特征点, 这使得在互相关分析过程中会出现异常值; (3) 国产 GF-1 卫星与 Landsat 8 相比, GF-1 卫星的轨道定位精度及稳定性以及相机镜头光学畸变等方面仍存在一些不足之处, 这使得在统一的技术框架下, 利用 GF-1 数据计算的冰川运动速度的精度略低于 Landsat 8 数据获取结果。但是, 本文通过获取到

的覆盖藏东南雅弄冰川的 GF-1 数据进行了冰川运动速度的提取, 经过与 Landsat 8 数据提取的冰川运动速度进行对比, 结果证明了利用 GF-1 卫星遥感数据在山地冰川运动速度监测应用中的可行性。同时, 国产 GF-1 卫星在数据价格、空间分辨率、时间分辨率等方面相比于 Landsat、ASTER、SPOT 等数据具有独特的优势, 可为中国青藏高原地区的山地冰川运动速度变化监测提供可靠的数据支持。

志 谢 感谢中国资源卫星中心为本研究提供的 GF-1 WFV 影像数据; 感谢 USGS 提供的 Landsat OLI 影像数据。

参考文献 (References)

- Ayoub F, Leprince S and Keene L. 2009. User's guide to COSI-CORR co-registration of optically sensed images and correlation
- Bai Z G. 2013. Technical characteristics of gaofen-1 satellite. *Aerospace China*, (8): 5-9 (白照广. 2013. 高分一号卫星的技术特点. *中国航天*, (8): 5-9)
- Bolch T, Kulkarni A, Kääb A, Huggel C, Paul F, Cogley J G, Frey H, Kargel J S, Fujita K, Scheel M, Bajracharya S and Stoffel M. 2012. The state and fate of himalayan glaciers. *Science*, 336 (6079): 310-314 [DOI: 10.1126/science.1215828]
- Bolch T, Piczonka T and Benn D I. 2011. Multi-decadal mass loss of glaciers in the Everest area (Nepal Himalaya) derived from stereo imagery. *The Cryosphere*, 5(2): 349-358 [DOI: 10.5194/tc-5-349-2011]
- Dehecq A, Gourmelen N and Trouve E. 2015. Deriving large-scale glacier velocities from a complete satellite archive: application to the Pamir-Karakoram-Himalaya. *Remote Sensing of Environment*, 162: 55-66 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.01.031]
- Ding G X, Chen C P, Xie C W and Wang J. 2014. Study of the ice tongue ablation features of a large glacier in the south slopes of the Mt. Tuomuer in the Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 36(1): 20-29 (丁光熙, 陈彩萍, 谢昌卫, 王建. 2014. 西天山托木尔峰南麓大型山谷冰川冰舌区消融特征分析. *冰川冻土*, 36(1): 20-29) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0003]
- Heid T and Kääb A. 2012. Repeat optical satellite images reveal widespread and long term decrease in land-terminating glacier speeds. *The Cryosphere*, 6(2): 467-478 [DOI: 10.5194/tc-6-467-2012]
- Huang L and Li Z. 2009. Mountain glacier flow velocities analyzed from satellite optical images. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 31(5): 935-940 (黄磊, 李震. 2009. 光学遥感影像的山地冰川运动速度分析方法. *冰川冻土*, 31(5): 935-940)
- Jiang Z L, Liu S Y, Peters J, Lin J, Long S C, Han Y S and Wang X. 2012. Analyzing Yengisogat Glacier surface velocities with ALOS PALSAR data feature tracking, Karakoram, China. *Environmental Earth Sciences*, 67(4): 1033-1043 [DOI: 10.1007/s12665-012-1563-9]

- Jin H L, Yang G W, Liu J, Zang W Q and Zhou K. 2017. Block orthorectification for GF-1 satellite images based on SIFT algorithm. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 36(1): 58-62 (靳海亮, 杨贯伟, 刘军, 藏文乾, 周珂. 2017. 基于SIFT算法的GF-1卫星影像区域正射纠正. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 36(1): 58-62) [DOI: 10.16186/j.cnki.1673-9787.2017.01.010]
- Jing Z F, Ye B S, Jiao K Q and Yang H A. 2002. Surface velocity on the glacier No. 51 at Haxilegen of the Kuytun River, Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 24(5): 563-566 (井哲帆, 叶柏生, 焦克勤, 杨惠安. 2002. 天山奎屯河哈希勒根51号冰川表面运动特征分析. *冰川冻土*, 24(5): 563-566) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2002.05.015]
- Kääb A, Winsvold S H, Altena B, Nuth C, Nagler T and Wuite J. 2016. Glacier remote sensing using sentinel-2. Part I: Radiometric and geometric performance, and application to ice velocity. *Remote Sensing*, 8(7): 598 [DOI: 10.3390/rs8070598]
- Koblet T, Gärtner-Roer I, Zemp M, Jansson P, Thee P, Haeberli W and Holmlund P. 2010. Reanalysis of multi-temporal aerial images of Storglaciären, Sweden (1959-99)-Part 1: Determination of length, area, and volume changes. *The Cryosphere*, 4(3): 333-343 [DOI: 10.5194/tc-4-333-2010]
- Kong F S, Qiao G and Wang W A. 2016. Comparison and analysis of Glacier velocity measurement software based on optical image. *China Science and Technology Papers Online Quality Papers*, 9(12): 1240-1252 (孔繁司, 乔刚, 王卫安. 2016. 基于光学影像的冰流速测量软件比较与分析. *中国科技论文在线精品论文*, 9(12): 1240-1252)
- Leprince S, Barbot S, Ayoub F and Avouac J P. 2007. Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(6): 1529-1558 [DOI: 10.1109/tgrs.2006.888937]
- Li C X, Yang T B and Tian H Z. 2013. Variation of West Kunlun Mountains glacier during 1990-2011. *Progress in Geography*, 32(4): 548-559 (李成秀, 杨太保, 田洪阵. 2013. 1990—2011年西昆仑峰区冰川变化的遥感监测. *地理科学进展*, 32(4): 548-559) [DOI: 10.11820/dlkxjz.2013.04.007]
- Liu S Y, Shangguan D H, Ding Y J, Han H D, Zhang Y, Wang J, Xie C W, Ding L F and Li G. 2005. Glacier variations since the early 20th century in the Gangrigabu Range, Southeast Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27(1): 55-63 (刘时银, 上官冬辉, 丁永建, 韩海东, 张勇, 王建, 谢昌卫, 丁良福, 李刚. 2005. 20世纪初以来青藏高原东南部岗日嘎布山的冰川变化. *冰川冻土*, 27(1): 55-63) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2005.01.008]
- Mayr E, Juen M, Mayer C, Usabaliev R and Hagg W. 2014. Modeling Runoff from the Inylchek glaciers and Filling of Ice-Dammed Lake Merzbacher, Central Tian Shan. *Geografiska Annaler*, 96(4): 609-625 [DOI: 10.1111/geoa.12061]
- Meng S L, Pang Y, Zhang Z J and Li Z Y. 2019. Self-adaptive cloud detection approach for GaoFen-1 optical remote sensing data. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 38(1): 103-114 (蒙诗栋, 庞勇, 张钟军, 李增元. 2019. 高分一号光学遥感数据自适应云区识别. *红外与毫米波学报*, 38(1): 103-114) [DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2019.01.017]
- Rolstad C, Amlien J, Hagen J O and Lundén B. 1997. Visible and near-infrared digital images for determination of ice velocities and surface elevation during a surge on Osbornbreen, a tidewater glacier in Svalbard. *Annals of Glaciology*, 24: 255-261 [DOI: 10.1017/s026030550001226x]
- Rosenau R, Scheinert M and Dietrich R. 2015. A processing system to monitor Greenland outlet glacier velocity variations at decadal and seasonal time scales utilizing the Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 169: 1-19 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.07.012]
- Scambos T A, Dutkiewicz M J, Wilson J C and Bindshadler R A. 1992. Application of image cross-correlation to the measurement of glacier velocity using satellite image data. *Remote Sensing of Environment*, 42(3): 177-186 [DOI: 10.1016/0034-4257(92)90101-o]
- Scherler D, Leprince S and Strecker M R. 2008. Glacier-surface velocities in alpine terrain from optical satellite imagery—Accuracy improvement and quality assessment. *Remote Sensing of Environment*, 112(10): 3806-3819 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.05.018]
- Sun Y L, Jiang L M, Liu L, Sun Y F and Wang H S. 2016. 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. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 38(3): 596-603 (孙永玲, 江利明, 柳林, 孙亚飞, 汪汉胜. 2016. 基于Landsat-7 ETM+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. *冰川冻土*, 38(3): 596-603) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2016.0066]
- Wang K, Jing Z F, Wu Y W and Deng Y W. 2014. Latest survey and study of surface flow features of the Qiyi Glacier in the Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 36(3): 537-545 (王坤, 井哲帆, 吴玉伟, 邓玉伟. 2014. 祁连山七一冰川表面运动特征最新观测研究. *冰川冻土*, 36(3): 537-545) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0064]
- Wang Z T, Xin J Y, Jia S L, Li Q, Chen L F and Zhao S H. 2015. Retrieval of AOD from GF-1 16 m camera via DDV algorithm. *Journal of Remote Sensing*, 19(3): 530-538 (王中挺, 辛金元, 贾松林, 厉青, 陈良富, 赵少华. 2015. 利用暗目标法从高分一号卫星16 m相机数据反演气溶胶光学厚度. *遥感学报*, 19(3): 530-538) [DOI: 10.11834/jrs.20154110]
- Whillans I M, Jackson M and Tseng Y H. 1993. Velocity pattern in a transect across Ice Stream B, Antarctica. *Journal of Glaciology*, 39(133): 562-572 [DOI: 10.1017/s0022143000016452]
- Xu J L, Zhang S Q, Han H D, Liu S and Zhang Y. 2011. Change of the surface velocity of Koxkar Baxi glacier interpreted from remote sensing data, Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 33(2): 268-275 (许君利, 张世强, 韩海东, 刘时银, 张盈松. 2011. 天山托木尔峰科其喀尔巴西冰川表面运动速度特征分析. *冰川冻土*, 33(2): 268-275)
- Yao T D, Thompson L, Yang W, Yu W S, Gao Y, Guo X J, Yang X X, Duan K Q, Zhao H B, Xu B Q, Pu J C, Lu A X, Xiang Y, Kattel D B and Joswiak D. 2012. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate*

- Change, 2(9): 663-667 [DOI: 10.1038/nclimate1580]
- Ye Q H, Chen F, Yao T D, Wang J H, Liu Q, Zhang X Q and Kang S C. 2007. Tupu of glacier variations in the Mt. Naimona'nyi region, western Himalayas, in the last three decades. *Journal of Remote Sensing*, 11(4): 511-520 (叶庆华, 陈锋, 姚檀栋, 王景华, 刘强, 张雪芹, 康世昌. 2007. 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*, 11(4): 511-520 [DOI: 10.11834/jrs.20070471])
- Zhang X B, Zhao X S, Ge D Q, Liu B, Zhang L, Li M and Wang Y. 2018. Monitoring displacement of Laohugou glacier No. 12 based on Landsat 8 and TerraSAR-X images. *Journal of Remote Sensing*, 22(1): 153-160 (张晓博, 赵学胜, 葛大庆, 刘斌, 张玲, 李曼, 王艳. 2018. 利用 Landsat 8 和 TerraSAR-X 影像研究老虎沟 12 号冰川运动特征. *遥感学报*, 22(1): 153-160) [DOI: 10.11834/jrs.20186313]
- Zheng Q, Sun J B and Zhang Y. 2016. Fast and uniformly slipping Western-Kunlun Glaciers from time-series deformation analysis using periodically captured Landsat-8 imagery. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 36(7): 604-608 (郑茜, 孙建宝, 张永. 2016. 基于 Landsat-8 时间序列影像分析西昆仑山地区冰川滑移特征. *大地测量与地球动力学*, 36(7): 604-608) [DOI: 10.14075/j.jgg.2016.07.010]
- Zhou J M, Li Z and Guo W Q. 2014a. Estimation and analysis of the surface velocity field of mountain glaciers in Muztag Ata using satellite SAR data. *Environmental Earth Sciences*, 71(8): 3581-3592 [DOI: 10.1007/s12665-013-2749-5]
- Zhou J M, Li Z, He X B, Tian B S, Huang L, Chen Q and Xing Q. 2014b. Glacier thickness change mapping using InSAR methodology. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(1): 44-48 [DOI: 10.1109/lgrs.2013.2245854]
- Zhou J M, Li Z and Li X W. 2009. Research on rules of the valley glacier motion in western China based on ALOS/PALSAR interferometry. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 38(4): 341-347 (周建民, 李震, 李新武. 2009. 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*, 38(4): 341-347) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2009.04.010]
- Zhou J M, Li Z, Li X W, Liu S Y, Chen Q, Xie C and Tian B S. 2011. Movement estimate of the Dongkemadi Glacier on the Qinghai-Tibetan Plateau using L-band and C-band spaceborne SAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 32(22): 6911-6928 [DOI: 10.1080/01431161.2010.517225]

Extraction and analysis of mountain glacier movement from GF-1 satellite data

ZHOU Jianmin¹, ZHANG Xin^{1,2}, LIU Zhiping², LI Zhen¹

1. *Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*

2. *School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China*

Abstract: With ongoing and accelerating global climate change, temperate glaciers are very sensitive to variations in the temperature and precipitation, and thus are in fact regarded as natural indicators of climate change. Glacier velocity, which is a combination of ice deformation, bed deformation, and glacier sliding, is an important parameter to better study the dynamics of glaciers and their interplay with climate changes in the region. In situ observations serve as one of the most accurate methods for measuring glacier velocity, but the remote areas where glaciers develop have prevented frequent visitation by people. Remote sensing is more effective in glacier monitoring and has been applied to study glacier velocity in many regions of the Tibetan Plateau, such as in Karakoram, Himalaya, West Kunlun, and other areas. In recent years, the Chinese high-resolution optical remote sensing images has gradually increased, but there was not much use of Chinese produced satellite remote sensing images for monitoring glacier flow parameters in mountain regions. In view of this situation, this study tried to apply the domestic "GaoFen-1" satellite images (GF-1) to the extraction of Yanong Glacier flow in southeast Tibet. By preprocessing and applying feature tracking on all available pairs within a defined period to derive the velocity, the reliable glacier velocities can be obtained by selecting stable ground control points from the ice-free areas to register these GF-1 data and the offset can be computed. The accuracy of the glacier flow velocity derived from GF-1 data was assessed by the residual displacements in non-glacial stable regions and glacier flow velocity along the longitudinal profile of the Yanong Glacier compared to that of Landsat-8 data in the same resolution and at the same Periods. The evaluation results showed that: The average deviation of GF-1 data in non-glacial stable regions was $7.48 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, which was higher than that of landsat 8 (the average deviation was $4.58 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$), but less than 5% of the average velocity of glacier; The GF-1 data was consistent with Landsat 8 data in the change trend of glacier flow velocity along the longitudinal profile in the period from 2015 to 2016, and the mean square root of the deviation between them was 7.41 m, which was also less than 5% of the average glacier flow velocity. The results proved the feasibility of the application and the unique advantages of GF-1 satellite remote sensing data in monitoring of the mountain glacier velocity on the Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: GF-1, domestic satellite data, mountain glacier, Yanong Glacier, glacier velocity, normalized cross correlation

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42071084, 41571061, 41471066); Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA19070202); National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0501501, 2016YFA0600304)