

# 基于无人机影像的冰面流速与高程变化提取方法

符 茵<sup>1</sup>, 刘 巧<sup>2</sup>, 刘国祥<sup>1,3</sup>, 张 波<sup>1</sup>, 蔡嘉伦<sup>1</sup>, 王晓文<sup>1,3</sup>, 张 瑞<sup>1,3</sup>

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 611756; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 3. 高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室, 成都 611756)

**摘要:** 无人机遥感能够获取高精度、高分辨率的冰川表面三维形态, 有助于揭示冰川的运动和消融变化, 现已成为冰川变化监测的重要技术支撑。针对无人机高分辨率影像能够有效识别表碛覆盖型冰川表面细节特征点的优势, 本文引入金字塔影像集和最小二乘匹配方法联合开展特征点的追踪, 用以实现冰川表面特征点三维位移场提取和动态变化分析。以贡嘎山贡巴冰川冰舌区作为典型研究区域, 利用高分辨率无人机影像生成消融期前后(2018年6月9日和10月17日)的正射影像数据和数字表面模型, 基于2期正射影像提取冰川表面特征点并实施追踪以获得三维位移场, 在此基础上初步探明贡巴冰川冰舌段表面位移速率最大为7.51 cm/d, 垂向消融速率超过11 cm/d。本文相关研究数据和结果可为冰川及复杂地形山区地质灾害的监测提供参考。

**关键词:** 无人机; 最小二乘匹配; 金字塔影像; 贡巴冰川; 冰川消融

DOI: 10.11821/dlxb202105015

## 1 引言

冰川是全球重要的固态水资源, 同时也是气候变化的指示器<sup>[1]</sup>。1951—2009年期间, 中国平均气温升高了1.38℃, 其中青藏高原变暖率达到了0.4℃/10a<sup>[2]</sup>。相比于大陆型冰川, 季风海洋型冰川对气候的变化更加敏感, 在全球气候变暖的背景下, 表现出更高的动态变化和更高的物质交换水平<sup>[3-6]</sup>。已有研究表明, 高亚洲地区的喜马拉雅山脉、天山山脉、祁连山脉以及念青唐古拉山脉和横断山脉的冰川物质严重亏损, 尤其在藏东南地区达到了 $(-4.0 \pm 1.5) \text{ Gt a}^{-1}$  ( $(-0.62 \pm 0.23) \text{ m w.e. a}^{-1}$ )<sup>[7]</sup>。冰川的加速退缩, 除了雪线不断上升、冰川厚度不断变薄、流速持续减缓等外在表象, 还会诱发滑坡、泥石流和冰湖溃决导致的洪水等次生灾害<sup>[8]</sup>。

21世纪以来, 随着卫星遥感系统的不断发展, 基于遥感影像的地表变化监测技术已在冰川学研究中得到广泛应用<sup>[9-11]</sup>。然而, 受限于山岳冰川复杂的地形和气候环境影响, 以Landsat系列和Sentinel-2A/B为代表的光学卫星所获取到有效的影像数据仍相对匮乏<sup>[12]</sup>; 而以PALSAR系列和RadarSAT系列卫星为代表的SAR卫星所获取的遥感影像数

收稿日期: 2019-12-20; 修订日期: 2020-11-20

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0502700); 国家自然科学基金项目(41771402, 41871069, 41804009); 中国铁路总公司科技研究开发计划(P2018G004); 四川省科技计划(2018JY0564) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2017YFB0502700; National Natural Science Foundation of China, No.41771402, No.41871069; No.41804009; Technology Research and Development Program of China Railway Corporation, No.P2018G004; Science and Technology Program of Sichuan Province, No.2018JY0564]

作者简介: 符茵(1994-), 女, 河南信阳人, 博士生, 研究方向为遥感图像处理与分析。E-mail: rsyinfu@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 张瑞(1983-), 男, 河南驻马店人, 博士, 副教授, 研究方向为星载合成孔径雷达干涉时序建模与地表形变反演。E-mail: zhangrui@swjtu.edu.cn

据,则饱受热噪声和地形叠掩效应的制约<sup>[13]</sup>,使得精细化的冰川表面速度或高程变化等动态分析始终难以有序开展。

随着无人机技术的不断进步,无人机测绘已趋于成熟。因其体积小、成本低、影像采集周期灵活以及数据分辨率高等优势,能够更为准确的评估冰川表面运动和消融变化,现已成为冰川研究的技术手段之一<sup>[13-16]</sup>。然而,现有的基于无人机提取冰川动态变化研究大多采取人工干预制图和数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)差值法得到;亦或基于数字正射影像(Digital Orthophoto Map, DOM)使用区域相关匹配获得。对于前一种技术路线而言,人为误差无法避免;而对于后一种方法,图像区域纹理的差异对匹配可靠度的损失则较为显著<sup>[17]</sup>。进一步发展和完善针对高分辨率低空航摄影像的冰川动态观测与变化提取方法,仍是当前该领域的研究重点,对于冰川的研究具有重要的支撑作用与现实意义。

针对上述问题,本文提出了一套联合金字塔影像集和最小二乘匹配方法实施特征点的追踪、并在此基础上开展冰川表面特征点三维位移场提取的技术方法。为验证方法的可行性,选取位于青藏高原东南缘贡嘎山西坡的一条典型表碛覆盖型冰川——贡巴冰川作为实验区,利用高分辨率无人机影像生成消融期前后(2018年6月9日和10月17日)的正射影像数据和数字表面模型,进而提取得到了贡巴冰川末端平面位移速率场和垂直向消融速率场,以此对该冰川的运动和消融情况进行了初步分析,增进对表碛覆盖型冰川时空动态的理解,并为相关研究提供技术方法及数据参考。

## 2 研究方法 with 数据来源

本文对冰川表面特征点的追踪主要包括2个步骤:①特征点选取,首先利用Harris算子在1期影像上提取大量的地物特征点。②同名点追踪,以相关性分析作为依据,基于影像金字塔数据结构在2期影像上以模板匹配的方式进行同名点追踪,并通过最小二乘匹配得到最佳同名点坐标,实现亚像素级的匹配精度。

### 2.1 特征点选取

基于点特征的匹配方法在光学影像配准中被广泛应用,目前常用的影像特征点的方法基本原则都是将局部灰度变化的极值点作为特征点,来保证特征点所在区域内保有较大的信息量,以便开展后续的匹配工作<sup>[18]</sup>。对于冰川运动的分析,由于贡巴冰川冰舌段地势平缓,表碛覆盖厚而广泛,且多为两侧谷壁崩落在冰面上的岩屑,棱角明显,因此,本文采用基于角点检测的Harris算子来对冰面的特征点进行选取。Harris算子基于影像梯度的自相关函数进行角点检测<sup>[19]</sup>,抗噪能力强,定位精度高,其表达式为:

$$M = \sum_{x,y} w(x,y) \begin{pmatrix} g_x^2 & g_x g_y \\ g_x g_y & g_y^2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$R = \det M - k(tr(M))^2 \quad (2)$$

式中: $M$ 为梯度协方差矩阵; $w(x,y)$ 为窗口函数(权重矩阵),通常为高斯滤波器; $g_x$ 、 $g_y$ 分别表示 $x$ 和 $y$ 方向上的梯度; $R$ 为定义的角点响应函数,通过 $R$ 的大小判断该像素是否为角点; $\det$ 表示矩阵的行列式(Determinant); $k$ 为经验常数,一般取0.04~0.06; $tr(M)$ 表示矩阵的迹。

### 2.2 特征点选取

当利用Harris算子在1期影像上选取大量的特征点后,这里采用分层结构的金字塔影

像基于模板匹配在2期影像上进行特征点追踪, 并通过最小二乘匹配 (Least Square Matching, LSM) 对结果进行优化, 流程如图1所示。

因冰川表面不同部分流速不一致, 为了提高解算效率并规避粗差结果, 每层在匹配前根据金字塔影像上层结构的匹配结果对搜索区域进行预先判定, 以减少迭代过程中的

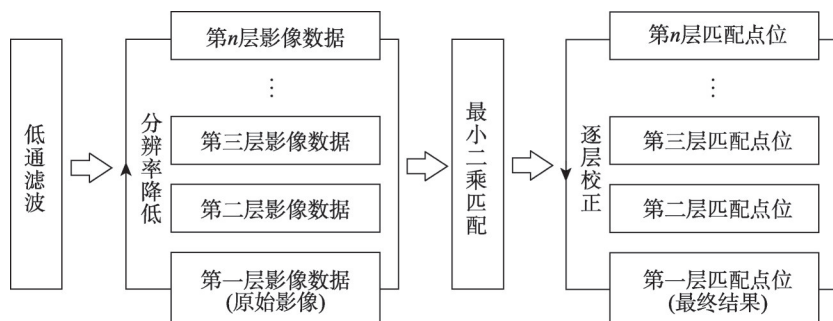


图1 结合金字塔影像的最小二乘匹配算法流程

Fig. 1 LSM algorithm combined with pyramid images

冗余计算与迭代次数 (图2)。首先, 通过低通滤波器对原始影像进行平滑处理, 这里采用高斯滤波器, 将原始影像作为高斯金字塔的第1级 (底层), 而后每一级影像均根据前一级影像滤波后做降采样得到, 即

$$g_i(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) g_{i-1}(2i+m, 2j+n) \quad (3)$$

式中:  $g_i(i, j)$  为第1级高斯金字塔影像;  $w(m, n)$  为具有低通特性的窗口函数。至此得到一组低于原始影像空间分辨率的金字塔影像, 一个金字塔结构式的模板匹配如图2所示, 从第 $N$ 级 (最低分辨率) 开始, 找到同名点  $P_N$  的粗略位置  $P'_N$  作为预测值, 然后在更高分辨率影像下和逐渐缩小的搜索区 (图中红色虚线方框) 中执行, 直到在原始分辨率下产生匹配点对  $P_1P'$  [20]。  $P_1P'$  的距离即为监测到的两期正射影像间冰川表面位移。

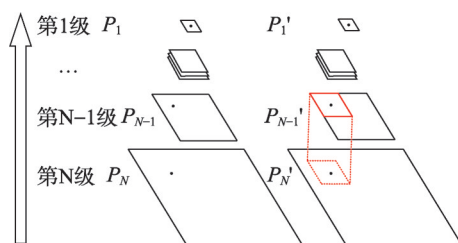


图2 金字塔影像结构下的模板匹配

Fig. 2 Pyramid image matching

其中, LSM可用于评估两个影像块之间的相似性[21], 来对匹配结果进行优化。该算法同时考虑影像的灰度和几何畸变, 对图像间的地物特征因地形陡峭或视角不同造成的差异抵抗性良好。LSM通过迭代进行相关性分析, 能最大程度的保证灰度匹配的均方根误差达到极小, 从而确定最佳同名点的位置, 获取亚像素级的匹配精度。LSM的具体实现过程如图3所示, 假设输入模板灰度为  $f(x, y)$ , 对应点为  $(x_f, y_f)$ , 待匹配窗口灰度  $g(x, y)$ , 对应点为  $(x_g, y_g)$ , 根据仿射变换模型便可建立坐标间的关系:

$$\begin{cases} x_g = a_0 + a_1 x_f + a_2 y_f \\ y_g = b_0 + b_1 y_f + b_2 x_f \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  为几何变形参数。我们通过双线性内插进行重采样, 并进行辐射畸变改正:

$$g(x, y) = h_0 + h_1 f(x, y) \quad (5)$$

式中:  $h_0$ 、 $h_1$  为辐射畸变参数。在此基础上, 计算输入模板与经过几何变换与辐射改正



后的待匹配窗口之间的相关系数，根据设定阈值判断循环是否结束。否则根据误差方程求解变形参数改正值  $dh_0$ 、 $dh_1$ 、 $da_0$  等，在获得改正后变形参数，如  $h_0$ 、 $h_1$ 、 $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  之后，再次进行循环迭代计算。以上过程利用迭代后得到的变形参数对其坐标进行改正，得到最优匹配点坐标，即为输入模板与待匹配窗口的最佳同名点坐标。

待获得所有同名特征点数据集后，即可提取冰川表面的水平位移，进而根据像素尺度和成像间隔解算冰川运动速率场；同时结合相应 DSM 数据，利用特征点的地理坐标反算即可得到每个特征点垂直向的消融变化。

3 研究区域与数据获取

3.1 研究区域概况

贡嘎山位于四川盆地向青藏高原东南缘过渡带中段（图4），是横断山地区现代冰川最发育的区域，环绕贡嘎山主峰共发育有冰川74条。贡巴冰川位于贡嘎山西坡，因冰川退化现已分离为大贡巴冰川和小贡巴冰川。值得一提的是，大贡巴冰川是贡嘎山西坡最长的山谷冰川，全长10.6 km，面积19.1 km<sup>2</sup> [22-24]，冰舌末端海拔3900 m，冰舌段平均坡度约为30° [25]。贡巴冰川作为表碛覆盖型冰川，其表碛厚度分布随海拔高度降低而增厚，在冰舌末端附近超过1 m [23]，其间也有不连续的裸露冰带或薄厚表碛相间分布地带，因贡巴冰

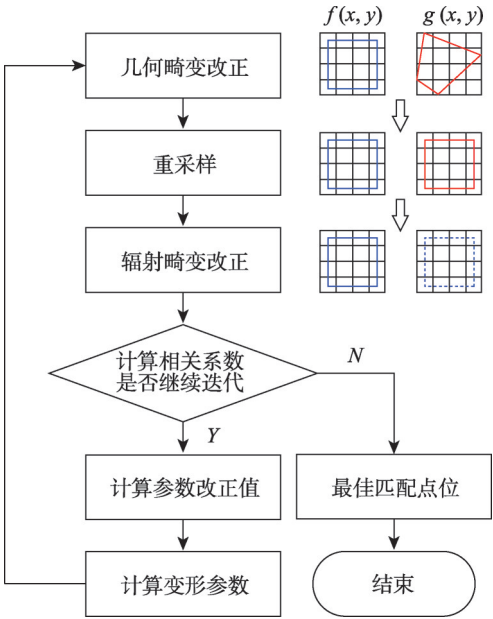


图3 最小二乘匹配实现过程

Fig. 3 Least squares matching process

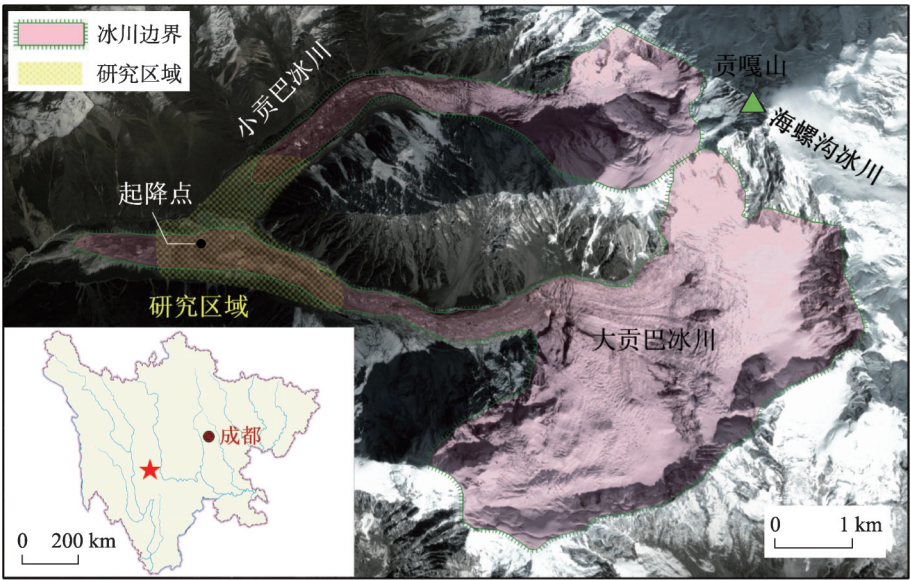


图4 研究区域

Fig. 4 Study area

川不同区域表碛厚度的差异性导致贡巴冰川消融分布差异明显<sup>[26-27]</sup>。冰舌中部零星分布有一定规模的冰面湖和冰崖,在大贡巴冰川侧碛垄与小贡巴冰川末端共发育2个规模较大、呈周期性蓄水的冰湖<sup>[24]</sup>。

根据1982—1983年的中国科学院青藏科考监测数据,贡巴冰川雪线高度分布于4900~5100 m,主要消融期为每年的5~10月。在贡巴冰川下游3700 m海拔的贡嘎寺,年平均气温1.9 °C,降雨量1173 mm。参考实测资料,贡巴冰川冷、暖季运动差异明显,在暖季贡巴冰川位移速率是冷季的2~3倍;消融方面,在冰舌末端,裸露冰面年消融4~13 m<sup>[12, 25-30]</sup>。

3.2 数据获取与处理

分别于2018年6月9日(第1期)和2018年10月17日(第2期)使用大疆 Phantom 4 Advanced无人机对大、小贡巴冰川消融区采集了2期影像数据。无人机航测相机配备1个2000万像素的CMOS传感器,镜头焦距24 mm(等效35 mm)。为保证成图和三维建模精度,使用航向重叠度85%、旁向重叠度55%的飞行参数;此外,由于海拔较高,单架次无人机飞行时间约25 min,2次航飞作业均采用连续飞行8个独立架次来保证研究区域的完整覆盖,无人机航测作业主要参数如表1所示。

因贡巴冰川地势险峻,难以实地布设像控点和采集坐标,但不同时间航摄数据缺少同一的地理参考势必引入系统误差,为了改进两期影像的绝对地理参考,需要对2期无人机航测空三结果校正到统一基准下。本文以第1期航摄数据作为基准,使用机载POS数据以无控制点模式在Pix4D中进行空三建模,生成DOM和DSM后,选择冰川侧碛垄外围的稳定地物(如裸露基岩或巨石等),并精确到亚像素量测其坐标值作为第2期的像控点完成空三解算,并在此基础上制作DOM和重建DSM。在完成前后两期DOM和DSM后,还需共同重采样至同一像元尺寸大小,在本文研究中,均采用0.1 m的地理格网来进行同名特征点的追踪。

表1 无人机摄影测量参数  
Tab. 1 UAV photogrammetry parameters

参数	2018-06-09	2018-10-17
获取图像数量	1727	2241
使用图像数量	1725	2148
照片尺寸(pixels)	5472×3648	5472×3648
传感器尺寸(mm)	12.8×8.6	12.8×8.6
飞行高度(m)	300~350	300~350
空间分辨率(cm/pixel)	7.38	5.99
覆盖面积(km <sup>2</sup> )	15.308	8.875

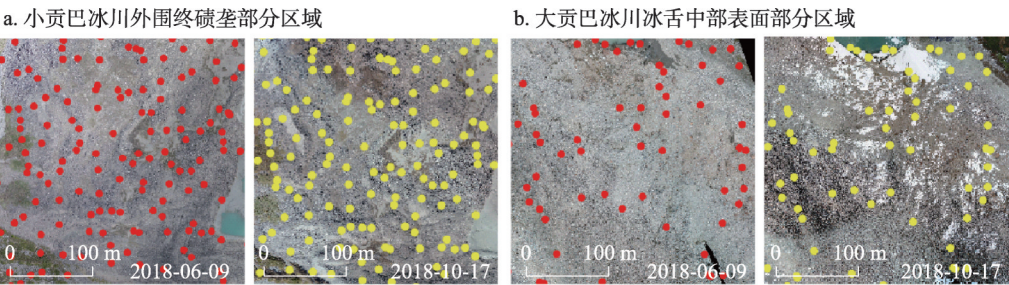
4 结果与分析

通过对获取的2期正射影像进行特征点跟踪,在2.8 km<sup>2</sup>的研究区域内共提取3998对有效特征点,平均点密度为1428个/km<sup>2</sup>。在冰川表面,有效特征点随着海拔的增加而减少(图5)。在冰川两侧沟谷以及侧碛垄区域,尽管受光照不同灰度存在较大的差异(图5a),但由于其相对稳定,特征点分布相对较密。而在大贡巴冰川冰舌中上部表面部分区域(图5b),10月因部分区域被积雪所覆盖,且在大贡巴冰川冰舌中部冰湖的空间形态和数量发生了明显改变,致使特征点密度较为稀疏。

4.1 贡巴冰川三维流速场提取与分析

本文实验提取的贡巴冰川4000~4300 m海拔区间三维位移速率场如图6所示。图7为相应位移速率的直方图统计分布,正负符号为表示不同分量的方向,为避免位移速率方向差异引起的统计异常,因此速率均值与标准差在取绝对值后进行计算。图6a为贡巴冰

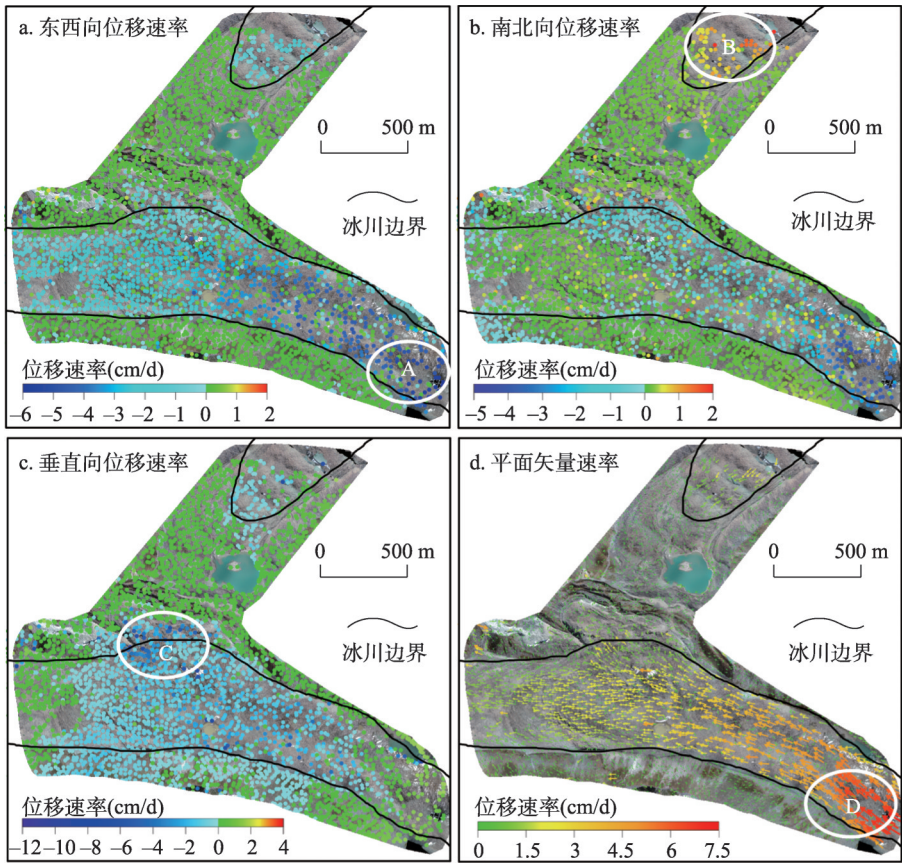




注：第 1 期影像上提取的特征点标记为红色，在第 2 期影像上追踪的匹配点标记为黄色。

图 5 特征点分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of feature points



注：正负号表示冰川运动分量的方向，其中东西向位移以东方向分量为正值，南北向位移以南方向分量为正值；白色边界为冰川位移最大处。

图 6 2018 年 6 月 9 日—10 月 17 日期间冰川位移速率场

Fig. 6 Glacier displacement rate field from June 9 to October 17, 2018

川东西向位移速率图，因大贡巴冰川大致呈东西走向，其东西向位移更加明显，最大处位于贡巴冰川冰舌中上部 A 处，达到 6.44 cm/d，平均速率 0.77 cm/d，多分布在 0~2 cm/d (图 7a)。小贡巴冰川冰舌末端山谷偏南北走向，因此南方向的位移量更加明显，如图 6b 所示，最大处位于冰舌末端 B 处，达到 2.58 cm/d，平均速率 0.35 cm/d，多分布在 0~1 cm/d。大贡巴冰川的运动在北方向的分量速率最大可达 4.25 cm/d (图 7b)，但在冰舌末

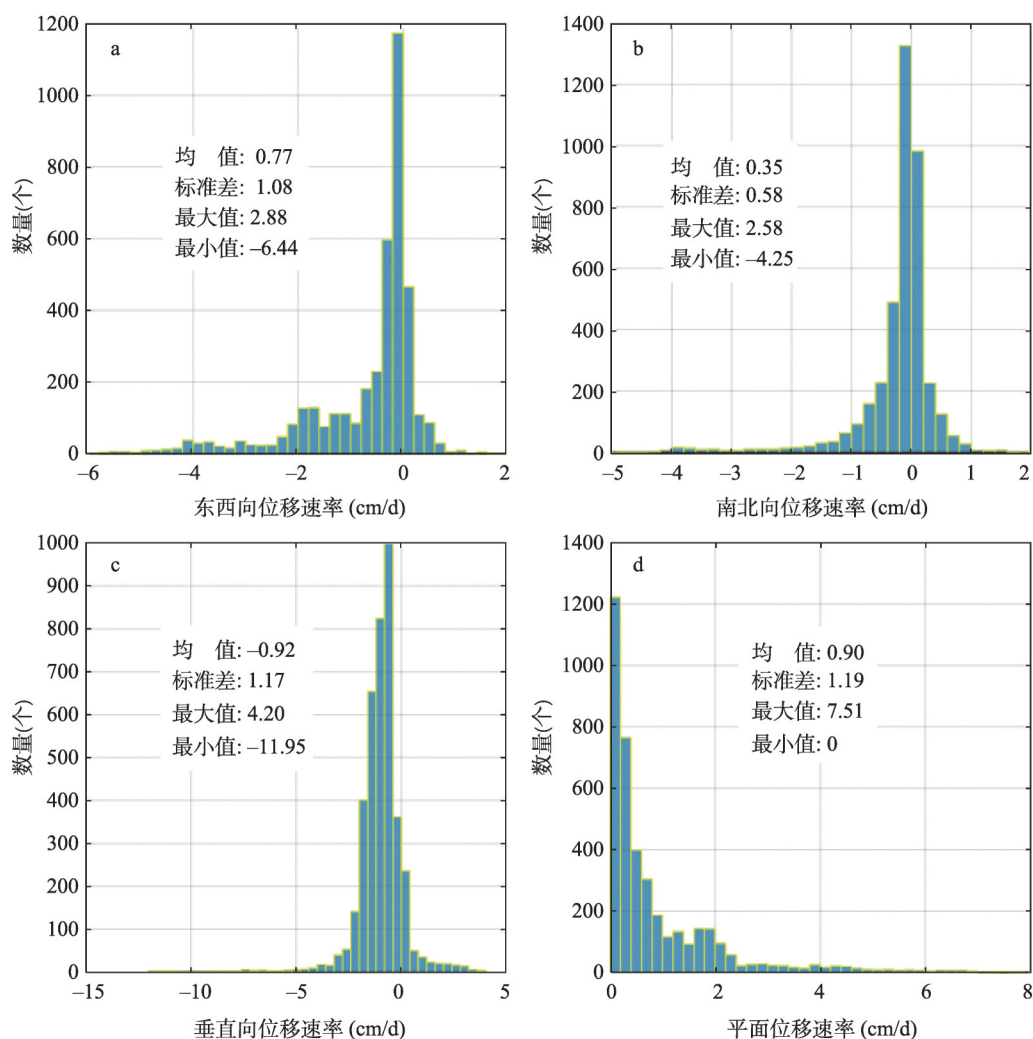


图7 2018年6月9日—10月17日期间冰川位移速率直方图统计

Fig. 7 Histogram statistical distribution of glacier movement from June 9 to October 17, 2018

端处, 由于山体的影响基本呈东西向走势, 因此南北向的运动分量基本为0; 图6c显示了研究区域内追踪特征点解算的垂直向消融速率场, 其中冰川区域大部分处于消融状态, 平均消融速率为0.92 cm/d, 消融最严重区域集中分布在冰湖周边, 最大位于大贡巴冰川侧碛垄的冰湖湖盆处, 消融速率超过11 cm/d (图7c)。图6d为通过南北向和东西向位移量计算获取的平面位移矢量场, 研究区域内平均速率为1.19 cm/d, 多分布在0~2 cm/d (图7d); 同东西向位移速率场分布相似, 运动速率最大的区域位于大贡巴冰川4300 m处, 达到7.51 cm/d。此外, 大、小贡巴冰川随着海拔的降低, 运动速率逐渐减缓, 而在冰川区域外侧的冰碛堆积体以及山体边坡基本保持稳定。

通常, 冰川运动主要受地形坡度的影响, 冰床梯度越大运动动能就越大使冰川流速增加。图8a为贡巴冰川区域地形坡度图, 从图中可知贡巴冰川冰舌末端地形坡度相对均匀, 地势较为平坦, 对冰川运动影响较小。为分析冰川运动速率和高程的相对关系, 沿图8a中蓝色矢量线段V提取了冰川位移场速率和高程纵向剖面, 分布如图8b所示, 大贡

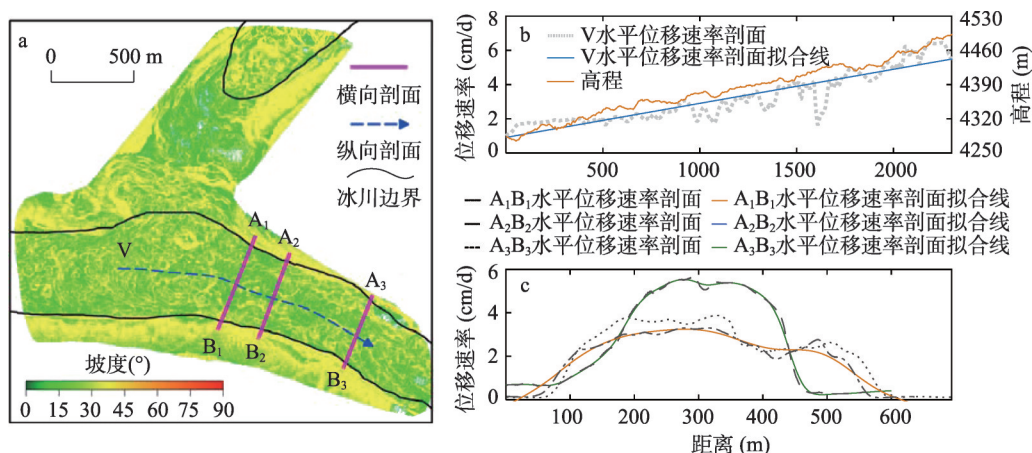


图8 冰川表面运动速率空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of glacial surface velocity

巴冰川冰舌段位移速率随高程的增加几乎呈线性增长；同时，分别沿图8a中A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>粉色线段提取冰川运动速率横向剖面，如图8c所示，贡巴冰川运动速度的横向分布表现为从中间到两侧逐渐减小，这主要是由于冰川中间冰体较厚，两侧冰体受山谷和侧碛垄摩擦阻拖所致。

#### 4.2 贡巴冰川的消融与物质亏损分析

海洋型冰川对气候变化反应快速且动态性强，如贡嘎山东坡的海螺沟冰川，其冰舌末端海拔2990 m<sup>[26]</sup>，较贡巴冰川约低1000 m，消融区冰面平均运动速率达到30 cm/d<sup>[12]</sup>，在全球气候变暖的背景下，其退化趋势更为明显。由于贡巴冰川冰舌段坡度平缓，表碛覆盖范围广而厚，对冰川的消融起着抑制作用，与海螺沟冰川相比贡巴冰川的活动性较弱，其运动速率和消融相对较缓<sup>[27]</sup>。

为了更加全面研究贡巴冰川夏季消融期间的变化，通过计算两期DSM之间的高程差值以评估冰舌段的冰量损失，经计算得到研究区域内物质亏损量为 $4.23 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，平均消融1.49 m，平均消融速率为1.15 cm/d。图9中，粉色矢量W为研究区域内消融最严重区域的剖面线，蓝色索引区域表示冰体严重亏损；黄色区域代表冰川表面抬升，通过三维实景判断，该区域因冰崖向下游方向运动，导致冰川冰崖局部DSM差值存在略微“抬升”的情况。实地调研与实验分析发现消融最严重区域集中分布在冰川的冰湖区域（图6d中D处），此处因上游冰川融水被冰碛垄阻塞，发育了一个面积超过 $6 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的冰湖<sup>[24]</sup>，2期无人机调查期间该冰湖经历了蓄水与渗漏，虽然坝体在此期间未发生较大变化，但对比2期航拍影像发现，该冰湖主要通过湖盆底部的冰下排水通道发生渗漏，由于冰下水系的分布极不稳定且变动频繁，局部的融透渗漏随时可能出现，甚至会引发湖盆底部暗河断面的塌陷（图10）。

#### 4.3 精度评定

在无人机影像三维重建时，虽然经像控点校正完成了两期DOM及DSM的绝对定向，然而受研究区域冰川作用的制约，像控点不均匀的分布可能会导致空中三角测量误差的残留，进而影响特征点匹配偏移追踪的精度。一般认为非冰川作用区的地表与高程短期内不会发生明显变化，统计和分析非冰川区域同名点之间的差异值，是对冰川流速和消融进行误差分析的常用方法<sup>[31]</sup>。为定量评价该时段内贡巴冰川流速和高程变化的精度，本文针对追踪到的特征点集，通过目视解译选取了72个分布在相对稳定区域的名



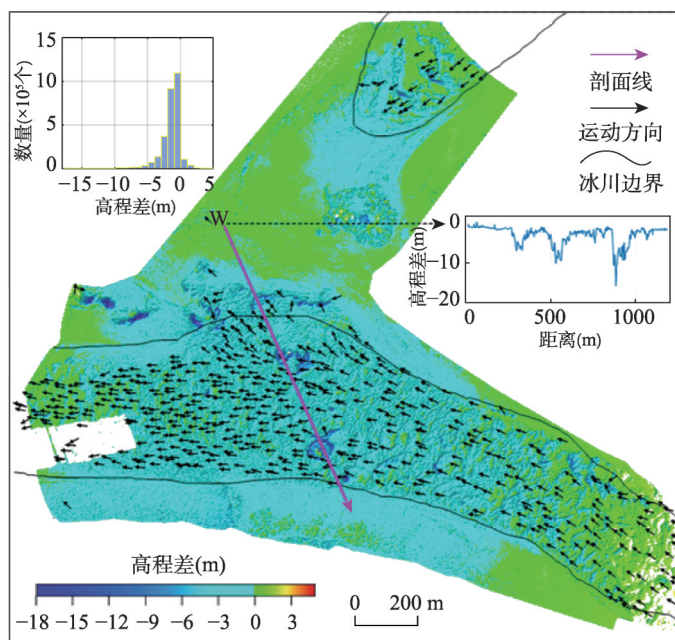


图9 研究区域高程变化

Fig. 9 The changes in elevation of the study area

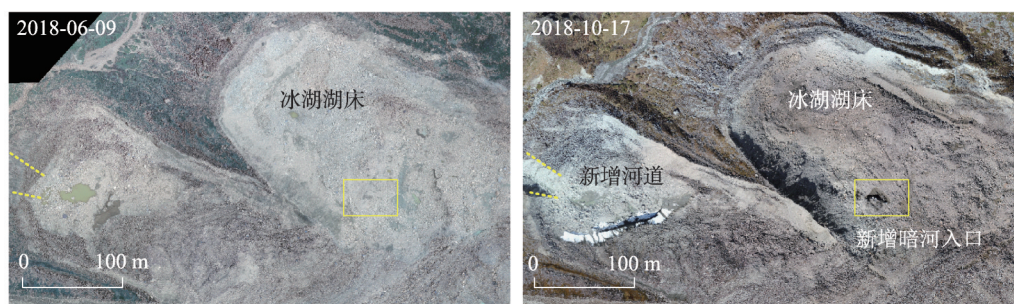


图10 2018年6月9日—10月17日期间冰川表面部分正射影像

Fig. 10 Comparison of some orthophotos of the glacier surface from June 9, 2018 to October 17, 2018

特征点作为检查点并以此估算误差,如小贡巴冰川侧碛垄外围与大贡巴冰川冰舌段边坡上稳定的地物目标(图11a)。误差分布如图11b所示,正负号为表明冰川运动分量的方向,水平误差中南北向以南方向分量为正值,东西向以东方向分量为正值。方框代表误差四分位数的范围,上下边缘为极值,红色中横线为误差的中位数;经统计,南北向和东西向误差 $\leq 6$  cm,且大部分结果显示偏差 $\leq 4$  cm,误差中位数分别为 $-0.59$  cm和 $-0.89$  cm,误差均值分别为 $-0.17$  cm和 $-0.51$  cm;垂直向误差则保持在 $\leq 60$  cm,且大部分结果 $< 50$  cm,误差中位数和均值分别为 $-20.7$  cm和 $-23.54$  cm。经计算,贡巴冰川南北向、东西向和垂直向的标准差分别为 $3.67$  cm、 $3.17$  cm和 $25.83$  cm。考虑到该时段为130 d,以标准差作为精度评价标准,冰川流速和高程变化的精度可换算为南北向 $\pm 0.28$  mm/d、东西向 $\pm 0.24$  mm/d、垂直向 $\pm 1.98$  mm/d,与贡巴冰川运动和消融的速率相比,可认定该精度标准下无人机三维重建及特征点偏移追踪的系统误差不会对贡巴冰川运动和消融的特征描述产生显著影响。

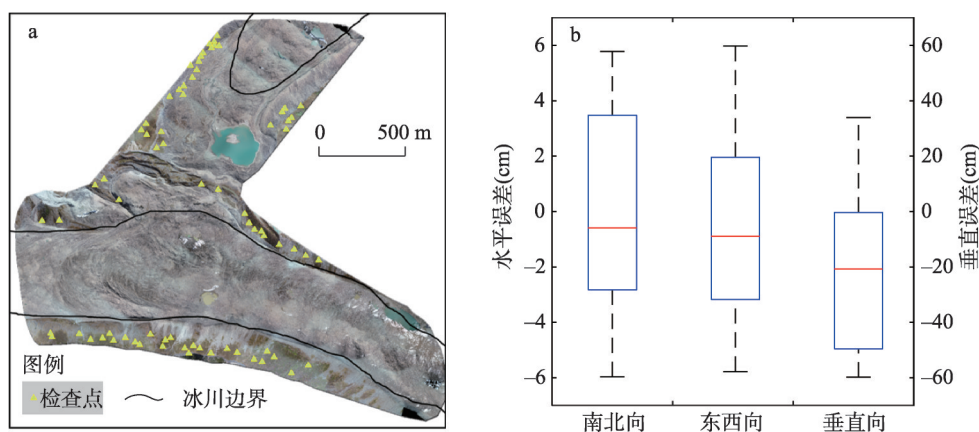


图 11 精度评定所选检查点分布和误差分析

Fig. 11 The check points distribution for accuracy assessment and error analysis

## 5 结论

为实现对冰川的运动和消融的深入解译分析,本文提出了联合金字塔影像集和最小二乘匹配方法,针对冰川表面特征点目标追踪并解算三维位移场的技术方法和流程。在具体应用方面,我们选取位于横断山脉地区的典型季风海洋型冰川——贡巴冰川作为实验区域,利用高分辨率无人机影像提取消融期前后(2018年6月9日和10月17日)的正射影像和数字表面模型。随后,基于DOM和DSM联合金字塔影像和最小二乘匹配方法解算了贡巴冰川末端平面位移速率场,并通过空间追踪的方法获取了垂直向的消融速率,最后借助三维实景模型对冰川的运动和消融开展分析和解释。

实测结果表明,2018年6—10月间,在海拔4000~4300 m的研究范围内,贡巴冰川冰舌段平均位移速率1.19 cm/d,运动速率最大位于大贡巴冰川海拔4300 m处,达到7.51 cm/d;在消融方面,研究区域平均消融速率0.92 cm/d,消融速率最大位于大贡巴冰川侧碛垄冰湖湖盆处,日均消融量超过11 cm。此外,借助无人机三维实景判断,贡巴冰川强消融区域多与冰湖的发育高度相关。本文的研究方法和技术流程可为冰川(尤其是表碛覆盖型冰川)运动和消融观测数据的获取提供借鉴,同时本文研究结果可为冰川物质平衡评价及冰冻圈相关研究提供方法和数据参考。

## 参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: Cambridge University Press.
- [2] Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory. Acta Geographica Sinica, 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. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16.]
- [3] Yao T D, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 663-667.
- [4] Zhang Y, Hirabayashi Y, Liu S Y. Catchment-scale reconstruction of glacier mass balance using observations and global climate data: Case study of the Hailuoguo catchment, south-eastern Tibetan Plateau. Journal of Hydrology, 2012, 444/445: 146-160.
- [5] Yang W, Yao T D, Guo X F, et al. Mass balance of a maritime glacier on the southeast Tibetan Plateau and its climatic sensitivity. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(17): 9579-9594.

- [6] Zhu M, Yao T, Yang W, et al. Differences in mass balance behavior for three glaciers from different climatic regions on the Tibetan Plateau. *Climate Dynamics*, 2018, 50(9/10): 3457-3484.
- [7] Brun F, Berthier E, Wagnon P, et al. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016. *Nature Geoscience*, 2017, 10(9): 668-673.
- [8] Bolch T, Kulkarni A, Kääb A, et al. The state and fate of Himalayan glaciers. *Science*, 2012, 336(6079): 310-314.
- [9] Altena B, Scambos T, Fahnestock M, et al. Extracting recent short-term glacier velocity evolution over southern Alaska and the Yukon from a large collection of Landsat data. *The Cryosphere*, 2019, 13(3): 795-814.
- [10] Scherler D, Leprince S, Strecker M R. Glacier- surface velocities in alpine terrain from optical satellite imagery: Accuracy improvement and quality assessment. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(10): 3806-3819.
- [11] Dehecq A, Gourmelen N, Trouvé E. Deriving large- scale glacier velocities from a complete satellite archive: Application to the Pamir-Karakoram-Himalaya. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 162: 55-66.
- [12] Liu Guoxiang, Zhang Bo, Zhang Rui, et al. Monitoring dynamics of Hailuoguo Glacier and the secondary landslide disasters based on combination of satellite SAR and ground-based SAR. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 980-995. [刘国祥, 张波, 张瑞, 等. 联合卫星SAR和地基SAR的海螺沟冰川动态变化及次生滑坡灾害监测. 武汉大学学报: 信息科学版, 2019, 44(7): 980-995.]
- [13] Bhardwaj A, Sam L, Martín-Torres F J, et al. UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 175: 196-204.
- [14] Hugenholtz C H, Whitehead K, Brown O W, et al. Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically- derived digital terrain model. *Geomorphology*, 2013, 194: 16-24.
- [15] Benoit L, Gourdon A, Vallat R, et al. A high-resolution image time series of the Gorner Glacier-Swiss Alps-derived from repeated unmanned aerial vehicle surveys. *Earth System Science Data*, 2019, 11(2): 579-588.
- [16] Wigmore O, Mark B G. Monitoring tropical debris-covered glacier dynamics from high- resolution unmanned aerial vehicle photogrammetry, Cordillera Blanca, Peru. *The Cryosphere*, 2017, 11: 2463-2480.
- [17] Dall'Asta E, Forlani G, Roncella R, et al. Unmanned aerial systems and DSM matching for rock glacier monitoring. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 127: 102-114.
- [18] Ye Y X, Bruzzone L, Shan J, et al. Fast and robust matching for multimodal remote sensing image registration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(11): 9059-9070.
- [19] Harris C G, Stephens M. A combined corner and edge detector. Manchester: Proceedings of Fourth Alvey Vision Conference, 1988.
- [20] Toet A, van Ruyven L J, Valetton J M. Merging thermal and visual images by a contrast pyramid. *Optical Engineering*, 1989, 28(7): 2877-2889. DOI: 10.1117/12.7977034.
- [21] Gruen A. Adaptive least squares correlation: A powerful image matching technique. *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography*, 1985, 14(3): 175-187.
- [22] Su Zhen, Shi Yafeng, Zheng Benxing. Quaternary glacial remains on the Gongga Mountain and the division of glacial period. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(5): 639-647. [苏珍, 施雅凤, 郑本兴. 贡嘎山第四纪冰川遗迹及冰期划分. 地球科学进展, 2002, 17(5): 639-647.]
- [23] Zhang Ningning, He Yuanqing, Duan Keqin, et al. Changes of Gongba Glacier in the west slope of Mt. Gongga during the past 25 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(3): 380-382. [张宁宁, 何元庆, 段克勤, 等. 贡嘎山西坡贡巴冰川25a的变化情况, 冰川冻土, 2008, 30(3): 380-382.]
- [24] Zhang Bo, Zhang Rui, Liu Guoxiang, et al. Monitoring of interannual variabilities and outburst regularities analysis of glacial lakes at the end of Gongba Glacier utilizing SAR images. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1054-1064. [张波, 张瑞, 刘国祥, 等. 基于SAR影像的贡巴冰川末端冰湖年际变化监测及溃决规律分析. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 1054-1064.]
- [25] Zhang Guoliang. The study of glacier changes in the Gongga Mountains [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012. [张国立. 贡嘎山地区现代冰川变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.]
- [26] Liu Qiao, Liu Shiyin, Zhang Yong, et al. Surface ablation features and recent variation of the lower ablation area of the Hailuoguo Glacier, Mt. Gongga. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 227-236. [刘巧, 刘时银, 张勇, 等. 贡嘎山海螺沟冰川消融区表面消融特征及其近期变化. 冰川冻土, 2011, 33(2): 227-236.]
- [27] Li Jijun, Su Zhen. *Glaciers in Hengduan Mountains*. Beijing: Science Press, 1996. [李吉均, 苏珍. 横断山冰川. 北京: 科学出版社, 1996.]



- [28] Cao Zhentang. The hydrologic characteristics of the Gongba Glacier in the Mount Gongga area. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1988, 10(1): 57-65. [曹真堂. 贡嘎山贡巴冰川水文特征. *冰川冻土*, 1988, 10 (1): 57-65.]
- [29] Liu Qiao, Zhang Yong. Studies on the dynamics of monsoonal temperate glaciers in Mt. Gongga: A review. *Mountain Research*, 2017, 35(5): 717-726. [刘巧, 张勇. 贡嘎山海洋型冰川监测与研究: 历史、现状与展望. *山地学报*, 2017, 35 (5): 717-726.]
- [30] Su Zhen, Song Guoping, Cao Zhentang. Maritime characteristics of Hailuoguo Glacier in the Gongga Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18 (Suppl.1) : 51-59. [苏珍, 宋国平, 曹真堂. 贡嘎山海螺沟冰川的海洋性特征. *冰川冻土*, 1996, 18 (Suppl.1): 51-59.]
- [31] Kraaijenbrink P, Meijer S W, Shea J M, et al. Seasonal surface velocities of a Himalayan glacier derived by automated correlation of unmanned aerial vehicle imagery. *Annals of Glaciology*, 2016, 57(71): 103-113.

## Monitoring glacier surface velocity and ablation using high-resolution UAV imagery

FU Yin<sup>1</sup>, LIU Qiao<sup>2</sup>, LIU Guoxiang<sup>1,3</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, CAI Jialun<sup>1</sup>,  
WANG Xiaowen<sup>1,3</sup>, ZHANG Rui<sup>1,3</sup>

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology of High-Speed Rail Safety, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** Unmanned Aerial Vehicle (UAV) has been developed to obtain high-precision, high-resolution and three-dimensional (3D) dynamic of glacier surface, which is helpful for revealing the movement and melting of glaciers, so it has become an important technology for glaciology researches. Because the high-resolution image data can be used to effectively identify the detailed features on the surface of the debris-covered glaciers, this study employed the pyramid image set combined with the least square matching (LSM) method to track the feature points of 3D displacement field. We acquired digital orthophoto map (DOM) and digital surface model (DSM) by UAV mapping at the lower part of Gongba Glacier, Mt. Gongga, on June 9 and October 17, 2018. Feature points were extracted and tracked to obtain a 3D glacier surface displacement field, which suggests that the mean surface displacement velocity was 7.51 cm/d and the ablation was over 11 cm/d at the glacier tongue. This study provides effective reference for monitoring glaciers and glacial related hazards in steep terrain regions and unreachable mountainous areas.

**Keywords:** UAV; LSM; pyramid image; Gongba Glacier; glacier ablation