

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0002

CHE Yanjun, WANG Shijin, LIU Jing. Application of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in the glacier region with complex terrain: a case study in Baishui River Glacier No. 1 located in the Yulong Snow Mountain[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4):1391-1399. [车彦军, 王世金, 刘婧. 无人机在冰川复杂地形监测中的应用——以玉龙雪山白水河1号冰川为例[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4):1391-1399.]

无人机在冰川复杂地形监测中的应用 ——以玉龙雪山白水河1号冰川为例

车彦军¹, 王世金², 刘 婧²

(1. 宜春学院, 江西 宜春 336000; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 冰川作为冰冻圈核心要素之一, 是气候变化的天然指示器。通过监测冰川变化, 可以了解局地或全球气候波动, 无人机飞行测量技术是当代冰川观测研究的重要监测技术。选取玉龙雪山白水河1号冰川为研究区, 利用无人机低空飞行航测, 获取冰川末端分辨率为0.09 m的正射影像和数字地表模型(DSM)。将正射影像与高分一号影像、Google Earth提供的Pléiade影像进行对比分析, 结果表明: 空间上, 无人机航测正射影像能较好的与高分一号、Pléiade影像产品进行匹配。高分辨率无人机航测影像, 能够很好地表达冰面地形和一些微地貌特征。同时, 无人机航测构建的空间分辨率为0.09 m的DSM模型, 对冰面地形特征反映地更为详尽和准确。此外, 本次航测结合历年卫星遥感数据和地形图资料表明: 自1957年至2018年5月, 白水河1号冰川末端平面距离累积退缩达(646.27±12.04) m。无人机技术在复杂地形、多云天气、人工观测难的冰川环境中开展摄影测量具有很大应用前景。通过冰川末端无人机航测实地验证, 将为下一步整条冰川物质平衡的监测和计算提供技术和方法支撑。

关键词: 无人机(UAV); 冰川; 正射影像; 数字地表模型(DSM)

中图分类号: P231; P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)04-1391-09

0 引言

冰川随气候变化而波动, 对气候变化极为敏感, 在全球气候变化评估中常以冰川波动来反映气候的变化^[1-7]。受冰川分布区交通和环境制约, 长期以来能够持续定位监测的冰川较少^[8-11]。随着科学技术不断进步和观测方法不断更新, 冰川学研究的方法也呈现出多元化, 从单点的地面观测到先进的全球卫星测量, 观测技术和数据获取方式的不断更新, 研究数据越来越丰富^[12-20]。例如, 王伟婷等^[21]利用Landsat卫星MSS/TM影像对冰川范围的变化进行了识别, 并通过地形图和SRTM计算了那木纳尼峰地区冰川厚度的变化。Pieczonek等^[22]则通过SRTM、MSS/TM/ETM+、SPOT5以及Hexa-

gon KH-9影像, 对1975-2008年中天山AK-Shirak区域的冰川物质平衡变化进行了评估, 表明冰川物质平衡平均每年为(-51±0.36) m w. e. (water equivalent, 水当量, 简称w. e.), Inylchek和托木尔地区的物质平衡平均每年分别为(0.20±0.44) m w. e. 和(0.33±0.30) m w. e.。

长期以来, 地面观测主要集中于单点、小区域冰川, 而卫星遥感关注于全球尺度冰川, 受时间和空间尺度的限制, 在实际研究中, 二者的尺度往往过小或者过大, 彼此之间很难融合。近年来, 由于无人机(Unmanned Aerial Vehicle, 简称UAV)技术的发展和完善, 使其在不同空间尺度上可以按需连续获取高时空分辨率影像。因此, 有学者尝试利用中小型无人机解决冰川学问题, 并获得了较好的试

收稿日期: 2018-06-22; 修订日期: 2018-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41690143); 江西省自然科学基金项目(20202BAB213013); 丽江玉龙雪山省级旅游开发区管理委员会和达古冰山风景名胜管理局委托项目资助

作者简介: 车彦军(1988-), 男, 甘肃武山人, 讲师, 2017年在西北师范大学获博士学位, 从事气候变化与水文循环过程、无人机与GIS应用研究. E-mail: che_yanjun@126.com

通信作者: 王世金, 副研究员, 从事冰冻圈与可持续发展研究. E-mail: xiaohanjin@126.com.

验结果,目前试验区主要集中于阿尔卑斯山、斯瓦尔巴岛以及喜马拉雅山等地区冰川^[23-29]。基于阿尔卑斯山 Morteratsch 冰川和北极斯瓦尔巴岛 Austre Lovénbreen 冰川的试验表明,多旋翼无人机可以满足冰川区高分辨率影像获取和大比例尺地形图的绘制^[25-26]。无人机航测正射影像能更好地反映冰面高程变化和末端退缩,在表碛、冰崖以及湖泊分布区的研究中也有广泛应用^[27]。如大多数喜马拉雅山冰川消融区被表碛广泛覆盖,直接观测难度较大,但利用无人机的多期航测影像,可以有效地提取表碛区冰川运动速度和表面高程信息^[28-29]。总之,基于无人机航测技术可以获取冰川区高时空分辨率影像,在表碛区冰川消融、运动速度研究以及地形图绘制等方面具有明显的优势^[30]。然而,目前国内无人机技术在冰川学研究中的应用相对较少。

绝大多数遥感影像在解决山区科学问题时,易受天气(云、雨和雪等)影响。海洋性冰川具有强积累、强消融、运动速度快等特点,使地面监测难度非常大。同时,云雨天气频繁,山区可用的卫星光学影像极少,影像在时空尺度上很难同时满足研究需求。而传统航空摄影和雷达测量成本较高,且易受区域和环境条件的限制。中小型无人机飞行时间和高度自主性大,可以选择合适的时间窗口,避开云雨天气和在风力允许时云下飞行作业。同时,具有机动性强、分辨率高、操作简单以及成本低等优势,在未来冰川研究中具有很大潜力,尤其是观测难度较大的海洋性冰川。

本文选取白水河1号冰川末端复杂地形区,开展冰川无人机航测试验。通过中小型无人机航测技术,获取了复杂地形条件下冰川高时空分辨率的正射影像和数字地表模型(Digital Surface Model,缩写为DSM),丰富了白水河1号冰川的资料,为下一步无人机监测冰川物质平衡奠定基础,也可为解决复杂地形下冰冻圈的科学问题提供借鉴。

1 研究区概况

玉龙雪山(27°10′~27°40′N, 100°9′~100°20′E)位于青藏高原东南山区,隶属于横断山系,南北长约40 km,东西宽约15 km,最高峰为扇子陡,海拔5 596 m a. s. l.,是中国最南的一座雪山。从地质构造角度分析,玉龙雪山是青藏高原东南边缘横断山脉中一个受新构造运动强烈抬升而形成的褶皱断块山。山顶与峡谷底部的相对高差约达4 000 m,

多为悬崖峭壁。山区大气环流较为复杂,主要受西风环流和南亚季风天气系统影响。但由于其特殊的地理位置,西风环流到该地区所携带的水汽较少,降水主要来源于南亚季风,包括来自西太平洋的东南季风和孟加拉湾的西南季风。时间上,区域气候有非季风期(10月-次年5月)和季风期(6-9月)之分^[31-32]。非季风期,受较微弱的西风环流南支控制,由于其携带水汽较少,导致降水也稀少;而季风期,自6月开始,南亚季风北进控制山区,西风环流被迫向北移动至30°N以北区域,整个山区开始进入雨季,6-10月降水可占到全年降水的60%~90%。

基于定位观测和相关研究表明^[33-35],1982-2013年期间,玉龙雪山冰川减少至16条,面积退缩至4.76 km²。截至2017年,玉龙雪山分布冰川13条,面积4.48 km²。其中,白水河1号冰川为该区域面积最大冰川,长度减少至2017年的1.90 km,面积减少至1.32 km²。结合本研究目的和研究区地形特征,参考其他遥感影像,本次主要在白水河1号冰川末端,于2018年5月20日对冰川末端位置进行深入研究(图1)。图1(a)为2018年2月11日OLI影像,图1(b)为Google Earth提供的Pléiade卫星影像产品;图中冰川边界来源于中国第二次冰川编目数据^[36]。

2 数据来源与处理

2.1 冰川区遥感影像

本研究冰川区所用影像主要包括Google Earth提供的Pléiade卫星影像产品、高分一号(GF-1)影像、无人机航测影像以及Landsat 8 OLI影像。需要说明的是,Google Earth提供不同阶段的历史影像,但时间间隔不固定、现势性较差,本文下载的是Google Earth提供的Pléiade影像重采样至1.2 m的影像产品,即利用LocaSpaceViewer软件下载历史影像中最近的研究区影像(表1),采集时间为2015年11月21日,空间分辨率为1.2 m(对应17级分辨率)。

GF-1是我国于2013年4月26日发射的对地观测系统中第一颗高空间分辨率、多光谱卫星,重访周期为41天,时间分辨率较低。本文使用GF-1全色多光谱相机数据,包括2 m空间分辨率的PAN和8 m空间分辨率的MSS影像。结合研究区冰面特性、天气状况以及数据成本等因素,选用较清晰的

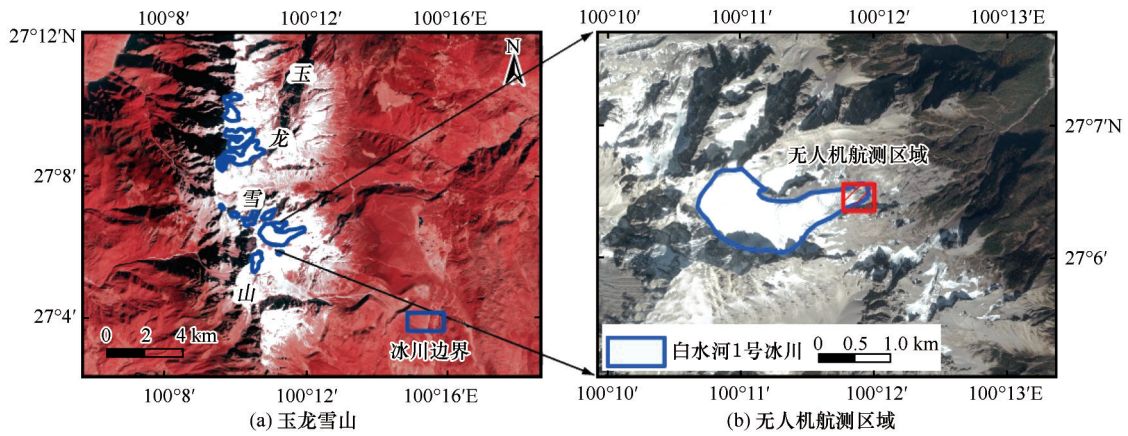


图1 玉龙雪山白水河1号冰川分布

Fig. 1 Location of Baishui River Glacier No. 1 in Yulong Snow Mountains

表1 本文研究所用数据列表

Table 1 The list of datasets used in this study

| 数据源 | 文件名 | 经度范围/E | 纬度范围/N | 时间 | 空间分辨率/比例尺 | 配准误差 |
|---------------|--------------------------|---------------------|-------------------|------------|----------------|-------|
| Landsat 8 OLI | LC81310412018042LGN00 | 99. 58°~101. 91° | 28. 48°~26. 36° | 2018-02-11 | Band5/4/3 30 m | ~14 m |
| Pléiade | Export11-55-03. tif | 100. 11°~100. 28° | 27. 15°~27. 01° | 2015-11-21 | 1. 2 m | ~11 m |
| GF-1 | GF1_PMS2_E100. 3_N27. 1_ | 100. 04°~100. 47° | 27. 30°~26. 92° | 2013-11-13 | MSS/8 m | ~11 m |
| | 20131113_L1A0000110550 | | | | PAN/2 m | |
| Phantom 4p | — | 100. 196°~100. 201° | 27. 109°~27. 104° | 2018-05-20 | <0. 10 m | ~9 m |
| 地形图 | 龙华 7-47-33 | 100. 00°~100. 25° | 27. 33°~27. 17° | 1957 | 1:50 000 | ~10 m |

注：“—”表示该数据没有确定名称。

2013年11月13日卫星影像，数据来源于中国科学院西北生态环境资源研究院高分数据中心。为了便于不同数据源影像的比较，基于ArcGIS和ENVI平台，利用地形图将本研究中所有影像进行空间配准，并将坐标系转换至WGS1984坐标系。需要说明的是：地形图进行空间几何配准时选取控制点的平均误差为10 m，再利用地形图对Landsat 8 OLI影像进行空间配准，后期整个数据处理过程中以Landsat 8 OLI影像为参照影像，且利用Landsat 8的全色波段将其Band5、Band4、Band3影像融合为

15 m空间分辨率影像。此外，文中关于玉龙雪山冰川现状分布数据，由玉龙雪山冰川与环境观测研究站提供。

2.2 无人机航测及数据处理

基于无人机航空测量已有经验和研究区特征，综合无人机安全性能等因素，本次试验选用多旋翼无人机：DJ Phantom 4p，后期数据处理使用Pix4Dmapper软件，最终目的为获取空间分辨率优于0.10 m的白水河1号冰川末端正射影像和DSM数据模型，整个项目实施流程如图2所示。需要说

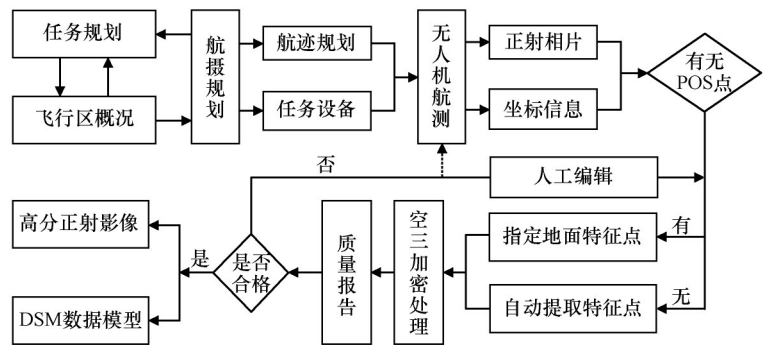


图2 无人机航测与数据处理流程

Fig. 2 Unmanned Aerial Vehicle (UAV) aerial survey and data processing flow

明的是,无人机航测获取的是DSM,而非DEM(数字高程模型),二者之间存在差异^[37]:DEM主要描述区域自然地貌形态的空间分布,DSM是除了包含区域自然地貌形态外,还包含地表建筑物、桥梁和树木等高度的地面高程模型。鉴于本次项目为高海拔作业,故将作业时间定为2018年5月20日上午11时,计划任务三架次:第一架次主要感受飞机升力、飞机姿态、高空风速以及飞机高度与山体的视觉高差,避免视觉误差造成飞机撞山、炸机等事故。第二架次按计划飞行,采用正射航测。第三架次,根据第二架次航测效果决定是否需要补摄或重摄。白水河1号冰川末端冰裂隙发育,地形复杂,难以布设地面像控点,但末端冰面差异性大、特征点明显,因此,本次试验采用无像控点航测。为了保证影像拼接和最终成果的精度,航测设计时,需注意:航向重叠一般为60%~80%,最小不得小于53%;旁向重叠一般为15%~60%,最小不得小于8%;倾斜摄影时需要考虑相片倾斜角、旋转角以及不同切斜角下的像片数等^[38]。需要说明的是本次无人机飞行模式为GPS模式,航测相对高度为90 m,影像重叠率为90%左右,每架次航时为15分钟。

2.3 误差分析

本文对白水河1号冰川末端相同区域的冰川面积进行人机交互式解译,Landsat 8 OLI(融合后的15 m空间分辨率影像)在用地形图校准和评估时,

选取控制点的平均误差约为14 m。冰川面积的误差主要通过以下公式评估^[39-41]:

$$U_T = \sqrt{\sum \lambda^2} + \sqrt{\sum \varepsilon^2} \quad (1)$$

$$U_A = \sum \lambda^2 \times \frac{2 \times U_T}{\sqrt{\sum \lambda^2}} + \sum \varepsilon^2 \quad (2)$$

式中: U_T 为冰川末端不确定性误差; U_A 为冰川面积不确定误差; λ 为每幅影像的空间分辨率; ε 为基于参照影像的空间几何配准误差。通过计算,可知GF-1影像解译面积的误差为 $0.24 \times 10^{-3} \text{ km}^2$,Pléiade影像解译面积的误差为 $0.21 \times 10^{-3} \text{ km}^2$,UAV影像解译面积的误差为 $0.19 \times 10^{-3} \text{ km}^2$ 。

3 结果与讨论

3.1 无人机航测正射影像

为了评估无人机航测冰川末端数据,将航测正射影像与GF-1、Pléiade影像进行空间对比分析,如图3。GF-1影像时间为2013年11月13日,空间分辨率为2 m,除冰面有少量积雪,周围无积雪覆盖。因此,基本可以确定末端冰川边界[图3(a)];同理,Google Earth提供的Pléiade影像重采样产品为2015年11月21日影像[图3(b)],空间分辨率为1.2 m,影像清晰度优于GF-1。由于太阳高度角和卫星拍摄姿态,GF-1和Pléiade影像中冰川均不同程度的受部分山体阴影影响,其中GF-1所受影响相对较大,而无人机航测正射影像基本无山体阴影遮挡[图3(c)]。

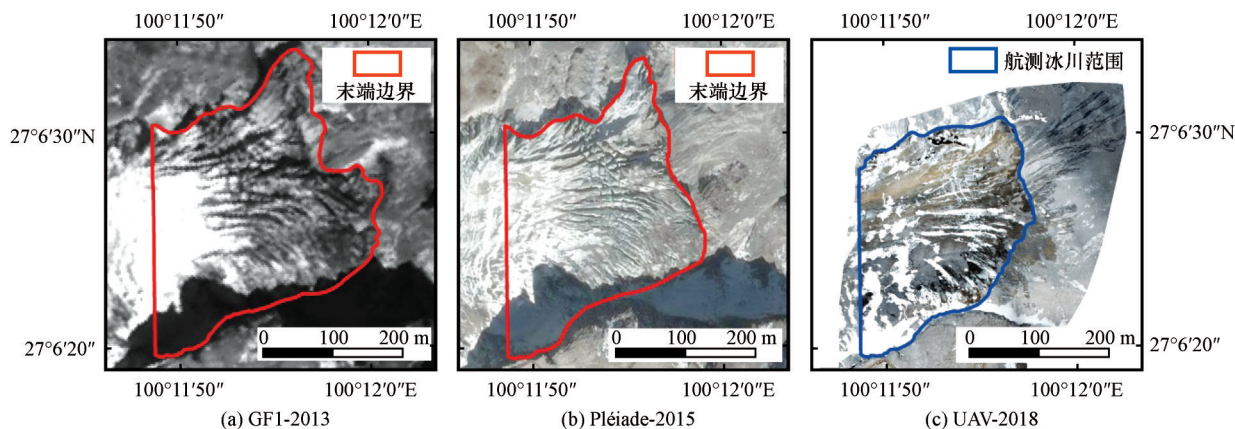


图3 无人机航测影像与高分1号影像、Pléiade影像产品对比

Fig. 3 Comparison of images derived from the GF-1 (a), Pléiade (b) and UAV orthophoto (c)

人机交互式解译方法的关键是解译者的经验和影像质量,本文的研究成员在该冰川频繁监测,对冰川具有较为丰富的经验,具备解译的先验

知识条件。就空间分辨率而言,无人机航测影像最高(0.09 m),但航测冰川范围有限[图3(c)]。GF-1和Pléiade空间分辨率低于无人机影像,但覆盖范

围较大,可以较清晰的读取冰川末端边界。因此,基于 ArcGIS 平台,利用人机交互式解译方法分别确定 GF-1 和 Pléiade 影像中冰川末端边界。同时,利用 ArcGIS 中矢量数据分析功能,对解译的冰川末端范围面积进行计算(图3)。结果表明:2013 年 GF-1 影像解译的冰川末端面积为 $(89.6 \pm 0.24) \times 10^{-3} \text{ km}^2$, 2015 年 Pléiade 影像解译的末端面积为 $(75.0 \pm 0.21) \times 10^{-3} \text{ km}^2$, 而无人机在该冰川末端区域的航测范围为 $(62.1 \pm 0.19) \times 10^{-3} \text{ km}^2$ 。GF-1 和 Pléiade 影像中冰川末端冰碛石、周围岩石与冰川的地形特征相同,在影像中表现出非常相近或几乎一致的光谱特性和纹理结构,尤其是空间分辨率相对较粗的 GF-1,即使对该区域具有非常丰富的经验知识,在读取冰川边界和冰面地貌形态时仍然存在一定的困难。而无人机轻便灵活、迅速成像,可以现场成像比对,使其在冰川区正射影像成图上具有较大优势。此外,无人机影像在时间分辨率和空间分辨率上也具有明显优势,尤其是云下航测成像,

是卫星遥感所不具备的。

3.2 无人机航测冰面地形

冰面高程模型在冰川学研究中具有重要地位。本次试验中,无人机航测正射采集影像信息时,同步获取冰面地形点云数据,经后期软件处理,生成航测冰川区 DSM 数字模型,其空间分辨率为 0.09 m,信息采集时间为 2018 年 5 月 20 日。如图 4(a)和 4(b),无人机航测生成的 DSM 中,冰川末端冰面高程变化与实际分布相符,且冰川末端东北区域高程相对最低,约为 4 400 m a. s. l.。同时,由 DSM 数字模型分布图[图 4(b)]可知,冰川末端 4 500 m a. s. l. 以下区域冰面较陡、地形复杂,该现象在正射影像[图 4(a)]中也有所体现。同理,在航测范围的西南区域,冰面坡度变化较缓,与现场观测一致。总体而言,无人机航测 DSM 数字模型与正射影像在空间上具有较好的一致性,均能很好地反映冰川末端航测区域的冰面特征和地貌形态。

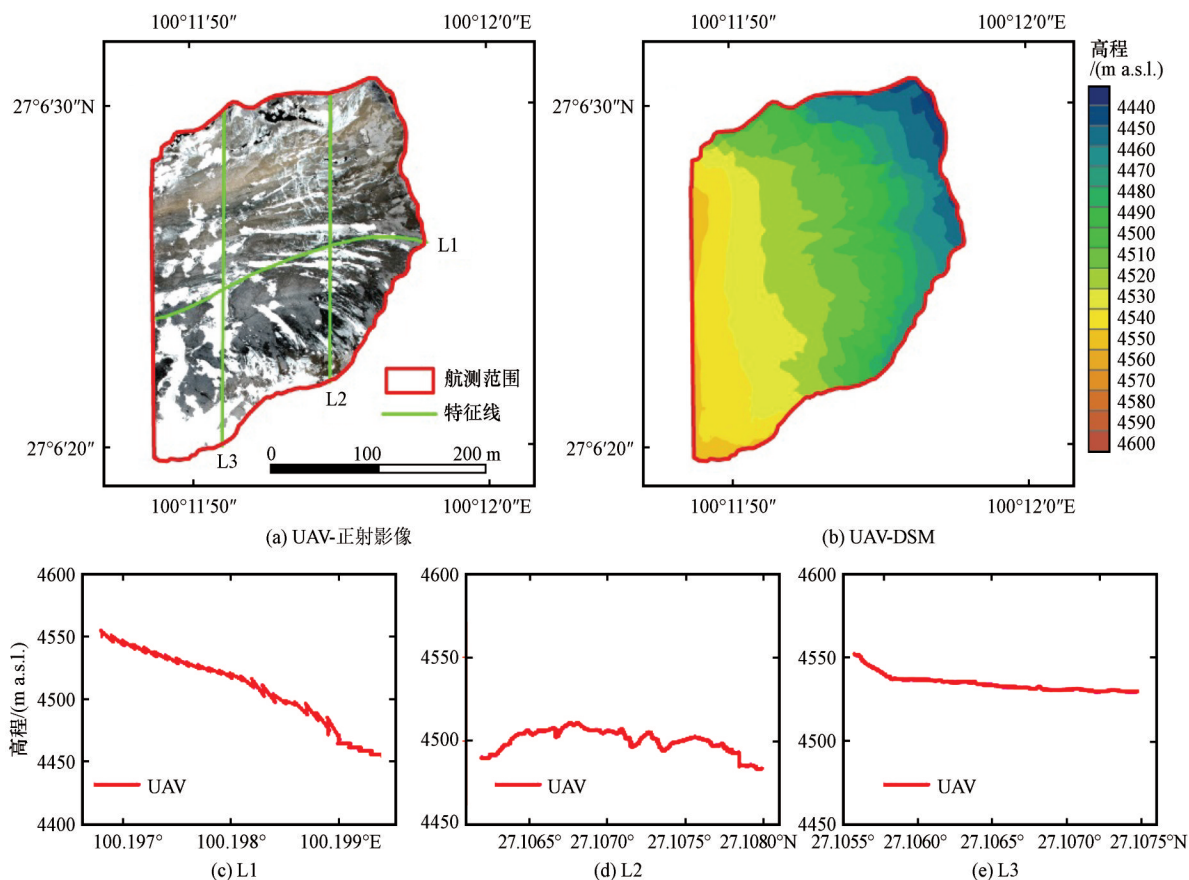


图4 冰川末端航测范围DSM数字模型

Fig. 4 UAV DSM model in the aerial survey region of the glacier terminal

为进一步定量评估 DSM 数字模型对冰川末端地形的表达能力,在航测区域特选取三条特征线:

L1、L2、L3,其中 L1 沿主流线,L2 和 L3 为经向特征线,如图 4(a)所示。根据特征线位置,结合 Arc-

GIS 空间分析模块, 进行空间叠置分析, 提取冰川末端表面高程信息[图 4(c)~4(e)]。主流线 L1 方向高程波动较频繁, 且高程存在突然的升高或降低现象, 说明该冰川末端地形相对复杂、横向裂隙较多, 冰面破碎化程度较高。经向特征线 L2 区域冰面地形相对 L3 波动较大, 说明越接近末端, 冰面地形越复杂、裂隙越发育。同时, L2 位于冰面高程 4 500 m a. s. l. 以下, 该区域冰面地形较陡、变化复杂。由此可知, 无人机航测生成的 DSM 数字模型, 能够很好地表达冰川末端地貌形态, 且对一些微地貌特征也能所反映。

3.3 冰川末端无人机航测分析

全球气候变暖背景下, 白水河 1 号冰川末端自

20 世纪中期以来, 呈退缩趋势。基于本次冰川末端实验结果, 结合早期地形图数据, 进行空间分析。需要说明的是, 玉龙雪山地形图是 1968 年基于 1957 年航空摄影拍摄的航空像片绘制而成的, 且假定 1957 年冰川末端位置是准确的。因此, 地形图中冰川末端位置的初始时间为 1957 年, 与 2018 年 5 月 20 日航测正射影像进行空间匹配和叠置分析。结果如图 5 所示, 白水河 1 号冰川末端位置, 1957 - 2018 年 5 月期间, 共累积退缩平面距离为 646.27 m。考虑到地形图几何配准时的误差约为 10 m, 而利用式(1)计算的 UAV 航测冰川末端的误差 U_T 为 14.08 m。所以, 白水河 1 号冰川最终的平面退缩距离为 (646.27 ± 12.04) m。

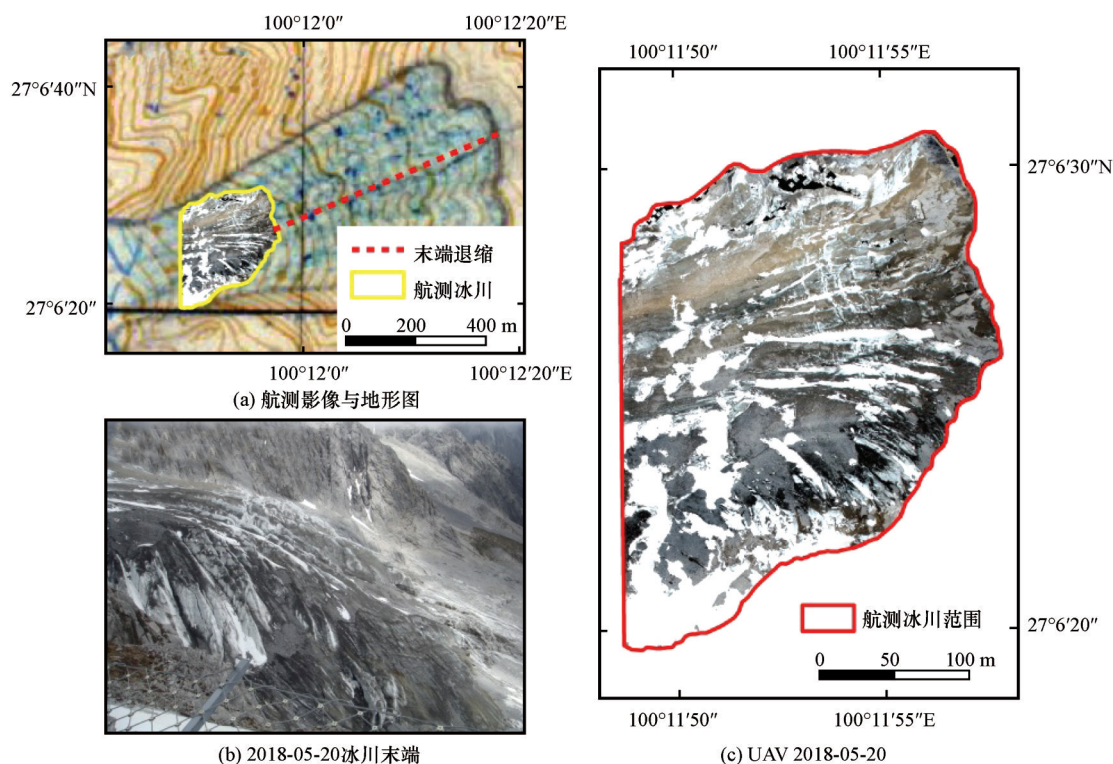


图5 白水河 1 号冰川末端退缩

Fig. 5 Terminal retreat of the Baishui River Glacier No. 1

4 结论与展望

山区复杂地形条件下, 获取高分辨率正射影像和数字高程模型是冰川学研究的关键。本文利用小型无人机对白水河 1 号冰川末端复杂地形区进行低空飞行试验, 获取了分辨率优于 0.10 m 的冰川末端正射影像和 DSM 数字模型, 为复杂地形冰川区精确大比例尺地形图的制作提供了技术支持和资料基础。地形特征和地物光谱特性易造成不同

空间分辨率影像上冰川与附近岩石纹理结构相近的混合区域, 容易使人对冰川范围和微地形产生误判。而中小型无人机机动性强、操作简单, 低空飞行可获取冰面高分辨率正射影像和点云数据, 不仅能够清晰解读冰面微地貌特征, 还在冰川地表模型构建方面具有明显的优势。结合地形图数据, 试验表明白水河 1 号冰川末端在 1957 - 2018 年平面距离累积退缩了 (646.27 ± 12.04) m。

本次试验表明: 复杂地形冰川区, 尤其是观测

难度较大的海洋性冰川, 无人机航测获取正射影像和冰面数字高程模型的数据时, 在时间和空间尺度上具有较好的灵活性。尽管本次试验未能对整条冰川进行航测, 但冰川末端的试验成功获取了正射影像和冰面高程信息, 为下一步白水河1号冰川物质平衡的无人机监测提供了技术保障。此外, 无人机也受天气系统影响, 如云层高度影响飞机航高, 雾、霜、雨、雪等天气影响飞机稳定性和相机镜头清晰度。大风天气作业, 飞行姿态受影响, 容易出现失控。另外, 无人机由于续航能力有限, 相对卫星遥感, 单次作业其空间覆盖范围相对较小, 航飞作业中要时刻关注电量, 确保安全返航。因此, 无人机作业时, 必须避开不利天气, 并随时关注飞行区气象变化, 如低空风切变等。总而言之, 中小型无人机在未来冰川研究中具有非常大的潜力, 尤其是冰川正射影像获取、DSM模型构建以及大比例尺地形图制作方面, 可以有效弥补地面观测和卫星遥感的不足, 为解决传统冰川物质平衡观测困难及其不足提供技术支撑。

参考文献(References):

- [1] Immerzeel W W, Van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers[J]. *Science*, 2010, 328(5984): 1382 – 1385.
- [2] Immerzeel W W, Pellicciotti F, Bierkens M F P. Rising river flows throughout the twenty-first century in two Himalayan glacierized watersheds[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(9): 742 – 745.
- [3] Chen Deliang, Xu Baiqing, Yao Tandong, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(32): 3025 – 3035. [陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来[J]. *科学通报*, 2015, 60(32): 3025 – 3035.]
- [4] Jansson P, Hock R, Schneider T. The concept of glacier storage: a review[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 282(1): 116 – 129.
- [5] Kaser G, Grotzhauser M, Marzeion B. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(47): 20223 – 20227.
- [6] Oerlemans J. Quantifying global warming from the retreat of glaciers[J]. *Science*, 1994, 26(5156): 243 – 245.
- [7] Qin Dahe, Zhou Botao, Xiao Cunde. Progress in studies of cryospheric changes and their impacts on climate of China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(5): 869 – 879. [秦大河, 周波涛, 肖存德. 冰冻圈变化及其对中国气候的影响[J]. *气象学报*, 2014, 72(5): 869 – 879.]
- [8] Che Y, Zhang M, Li Z, et al. Glacier mass-balance and length variation observed in China during the periods 1959 – 2015 and 1930 – 2014[J]. *Quaternary International*, 2017, 454: 68 – 84.
- [9] Immerzeel W, Bierkens M. Asia's water balance[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5: 841 – 842.
- [10] Viviroli D, Dürr H, Messerli B, et al. Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43: W07447.
- [11] Yang T, Wang C, Chen Y, et al. Climate change and water storage variability over an arid endorheic region[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 330 – 339.
- [12] Gardelle J, Berthier E, Arnaud Y. Slight mass gain of Karakoram glaciers in the early twenty-first century[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(5): 322 – 325.
- [13] Gardner A S, Moholdt G, Cogley J, et al. A Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea Level Rise: 2003 to 2009[J]. *Science*, 2013, 340(6134): 852 – 857.
- [14] Neckel N, Kropáček J, Bolch T, et al. Glacier mass changes on the Tibetan Plateau 2003 – 2009 derived from ICESat laser altimetry measurements[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(1): 014009.
- [15] Shangguang Donghui, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. Glacier changes at the head of Yurungkax River in the West Kunlun Mountains in the past 32 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 855 – 862. [上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 玉龙喀什河源区32年来冰川变化遥感监测[J]. *地理学报*, 2004, 59(6): 855 – 862.]
- [16] Kang Shichang, Chen Feng, Ye Qinghua, et al. Glacier retreating dramatically on the Mt. Nyainqentanglha during the last 40 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(6): 869 – 873. [康世昌, 陈锋, 叶庆华, 等. 1970 – 2007年西藏念青唐古拉峰南、北坡冰川显著退缩[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(6): 869 – 873.]
- [17] Yi S, Sun W. Evaluation of glacier changes in high-mountain Asia based on 10 year GRACE RL05 models[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(3): 2504 – 2517.
- [18] Matsuo K, Heki K. Time-variable ice loss in Asian high mountains from satellite gravimetry[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 290(1): 30 – 36.
- [19] Pieczonka T, Bolch T, Wei J, et al. Heterogeneous mass loss of glaciers in the Aksu-Tarim Catchment (Central Tien Shan) revealed by 1976 KH-9 Hexagon and 2009 SPOT-5 stereo imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 130: 233 – 244.
- [20] Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663 – 667.
- [21] Wang Yiting, Chen Xiuwan, Bo Yanchen, et al. Monitoring glacier volume change based on multi-source DEM and multi-temporal remote sensing images: a case study in the Mount Naimona'nyi region on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(1): 126 – 132. [王祎婷, 陈秀万, 柏延臣, 等. 多源DEM和多时相遥感影像监测冰川体积变化——以青藏高原那木纳尼峰地区为例[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(1): 126 – 132.]
- [22] Pieczonka T, Bolch T. Region-wide glacier mass budgets and area changes for the Central Tien Shan between 1975 and 1999 using Hexagon KH-9 imagery[J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 128: 1 – 13.
- [23] 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[J]. *Annals of glaciology*, 2016, 57(71): 103 – 113.
- [24] Poblete T, Ortega-Farías S, Ryu D. Automatic coregistration algorithm to remove canopy shaded pixels in UAV-Borne ther-

- mal images to improve the estimation of crop water stress index of a drip-irrigated cabernet sauvignon vineyard [J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 397.
- [25] Rossini M, Di Mauro B, Garzonio R, et al. Rapid melting dynamics of an alpine glacier with repeated UAV photogrammetry [J]. *Geomorphology*, 2018, 304: 159 – 172.
- [26] Tonkin T N, Midgley N G, Cook S J, et al. Ice-cored moraine degradation mapped and quantified using an unmanned aerial vehicle: A case study from a polythermal glacier in Svalbard [J]. *Geomorphology*, 2016, 258: 1 – 10.
- [27] Wigmore O, Mark B. Monitoring tropical debris-covered glacier dynamics from high-resolution unmanned aerial vehicle photogrammetry, Cordillera Blanca, Peru [J]. *The Cryosphere*, 2017, 11: 2463 – 2480.
- [28] Immerzeel W W, Kraaijenbrink P D A, Shea J M, et al. High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 150: 93 – 103.
- [29] Kraaijenbrink P, Shea J M, Pellicciotti F, et al. Object-based analysis of unmanned aerial vehicle imagery to map and characterise surface features on a debris-covered glacier [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 581 – 595.
- [30] Azzoni R S, Fugazza D, Zerbini A, et al. Evaluating high-resolution remote sensing data for reconstructing the recent evolution of supra glacial debris: a study in the Central Alps (Stelvio Park, Italy) [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2018. DOI: 10.1177/0309133317749434.
- [31] Niu H, He Y, Zhu G, et al. Environmental implications of the snow chemistry from Mt Yulong, southeastern Tibetan Plateau [J]. *Quaternary International*, 2013, 313 – 314: 168 – 178.
- [32] Tian L, Masson-Delmotte V, Stievenard M, et al. Tibetan Plateau summer monsoon northward extent revealed by measurements of water stable isotopes [J]. *Journal of Geophysical research*, 2001, 106(D22): 28081 – 28088.
- [33] Li Jijun, Su Zhen. *Hengduan Mountains glaciers* [M]. Beijing: Science Press, 1996. [李吉均, 苏珍. 横断山冰川[M]. 北京: 科学出版社, 1996.]
- [34] Du Jiankuo, Xin Huijuan, He Yuanqing, et al. Response of modern monsoon temperate glacier to climate change in Yulong Mountain [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33 (7): 890 – 896. [杜建括, 辛惠娟, 何元庆, 等. 玉龙雪山现代季风温冰川对气候变化的响应[J]. 地理科学, 2013, 33(7): 890 – 896.]
- [35] Du J, He Y, Li S, et al. Mass balance and near-surface ice temperature structure of Baishui Glacier No. 1 in Mt. Yulong [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23 (4): 668 – 678.
- [36] Liu Shiyin, Guo Wanqin, Xu Junli, et al. The second glacier inventory dataset of China (Version 1.0) [DB/OL]. Cold and Arid Regions Science Data Center at Lanzhou, 2014.
- [37] Wang Hanying, Sun Shaohe, Wang Baoqing, et al. Analysis of similarities and differences between DEM and DSM data in production and application [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2018, 41(3): 156 – 158. [王汉英, 孙绍河, 王保庆, 等. 关于DEM和DSM数据在生产与应用中的异同分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(3): 156 – 158.]
- [38] State Bureau of Surveying and Mapping of the People's Republic of China. Specifications for low-altitude digital aerial photograph [S]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2010. [国家测绘局. 低空数字航空摄影规范[S]. 北京: 测绘出版社, 2010.]
- [39] Williams J R S, Hall D K, Chien J Y L. Comparison of satellite-derived with ground-based measurements of the fluctuations of the margins of Vatnajökull, Iceland, 1973 – 1992 [J]. *Annals of Glaciology*, 1997, 24: 72 – 80.
- [40] Hall D K, Bayr K J, Schöner W, et al. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from the ground and space (1893 – 2001) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4): 566 – 577.
- [41] Silverio W, Jaquet J M. Glacial cover mapping (1987 – 1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(3): 342 – 350.

Application of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in the glacier region with complex terrain: a case study in Baishui River Glacier No.1 located in the Yulong Snow Mountain

CHE Yanjun¹, WANG Shijin², LIU Jing²

(1. Yichun University, Yichun 336000, Jiangxi, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: As one of the core elements in the cryosphere, glacier is the natural indicator of climate change. By monitoring the changes in glaciers, we can understand the local or global climate change, and the technology of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is an important method for monitoring and studying glaciers today. In this paper, we choose Baishui River Glacier No. 1 in Yulong Snow Mountains as the study region. The orthographic image with the resolution of 0.09 m in the terminus of the glaciers and the digital surface model (DSM) were produced by utilizing low-flying of UAV. Comparing the orthophotos with Gaofen No. 1 (GF-1) Image and Pléiade resampled image provided by Google Earth, the result presented that UAV orthophotos had a good match with the images of GF-1 and Pléiade product in space. The UAV image with high spatial resolution can accurately express the characteristics of glacier surface and some microtopography. At the same time, the digital surface model (DSM) derived from UAV survey was more exquisite and accurate in terms of the glacier surface topography, with the spatial resolution of 0.09 m. In addition, the front position of Baishui River Glacier No. 1 retreated 646.27 ± 12.04 m during the period of 1957 – 2018 based on this test of UAV survey and historical satellite remote sensing data. In general, UAV has significant advantages in the process of conducting photogrammetry in terms of those glacier environments, including complex terrain, cloud weather, and difficult manual observation. Besides, the on-the-spot verification of UAV survey at the end of the glacier will provide a reference for the next step in the monitoring and calculation of the mass balance of glaciers.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle (UAV); glacier; orthophoto; digital surface model (DSM)

(责任编辑: 王飞腾; 编辑: 周成林)