

DOI: 10.20103/j.stxb.202211013109

张彦丽, 陈刚, 马亚龙, 胡嘉正, 马宇鹏, 张丽萍. 基于 Sentinel-1 时序数据的山地冰川表面消融变化研究——以老虎沟 12 号冰川为例. 生态学报, 2024, 44(4): 1389-1403.

Zhang Y L, Chen G, Ma Y L, Hu J Z, Ma Y P, Zhang L P. Surface ablation changes of mountain glaciers based on Sentinel-1 time series data: Taking Laohugou Glacier No. 12 as an example. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1389-1403.

基于 Sentinel-1 时序数据的山地冰川表面消融变化研究

——以老虎沟 12 号冰川为例

张彦丽^{1,3,*}, 陈刚^{1,2,3}, 马亚龙^{1,3}, 胡嘉正^{1,3}, 马宇鹏^{1,3}, 张丽萍^{1,3}

1 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

2 国家能源集团宁夏煤业有限责任公司清水营煤矿, 银川 751400

3 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室, 兰州 730000

摘要: 冰川是影响气候变化的主要因素, 合成孔径雷达(SAR)不仅具有较高空间分辨率和多极化等特点, 而且对冰雪融化引起的介电常数变化较为敏感, 已成为山地冰川表面消融变化监测的重要数据源。基于 Sentinel-1 时序数据, 提出了一种综合应用多时相多极化 SAR 变化检测算法和 Sigmoid 函数的冰川表面消融监测方法。以祁连山老虎沟 12 号冰川为研究区, 利用“中心线—圆”方法获得的冰川东、西支 64 个样区, 通过各点 2019—2020 年 124 个时相的 SAR 后向散射系数变化特征确定了 7 个典型样区及 2019 和 2020 年冰川消融期; 基于同轨道参考影像与多时相融雪影像对比, 分别获得变化监测影像 VV 和 VH 极化后向散射系数, 对其进行权重组合后提取湿雪像元; 通过 Sigmoid 函数并结合湿雪平均海拔高度提取干雪, 从而得到 2 年冰川消融期内 16 个时相的冰川表面干湿雪分布。利用 2019 年 09 月 01 日无人机数字正射影像(DOM)以及与 Sentinel-1 邻近日期 5 景 Sentinel-2 影像对提取结果进行精度验证, 并结合冰川上气象站点气温和降水数据对误差结果进行深入分析。实验结果表明, 该方法能够有效提取冰川表面干、湿雪分布, 总体分类精度 OA 高达 96%, Kappa 系数高达 0.84。老虎沟 12 号冰川消融期及覆盖各类型消融变化规律存在年际变化: 2019 年冰川的消融期为 5 月初至 9 月中下旬, 2020 年的消融期为 6 月中下旬至 9 月初; 2019 年从消融季开始, 冰川表面干雪面积迅速减小, 而湿雪与冰川冰面积在整个消融期均较大, 但随着强降雪出现, 干雪面积骤然上升, 2020 年冰川冰和湿雪面积变化明显, 冰川冰面积持续增加, 湿雪面积持续减小, 而干雪面积在高海拔区趋于稳定。

关键词: 多极化 SAR; 后向散射系数; 多时相多极化变化检测; 冰川消融期

Surface ablation changes of mountain glaciers based on Sentinel-1 time series data: Taking Laohugou Glacier No. 12 as an example

ZHANG Yanli^{1,3,*}, CHEN Gang^{1,2,3}, MA Yalong^{1,3}, HU Jiazheng^{1,3}, MA Yupeng^{1,3}, ZHANG Liping^{1,3}

1 College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2 National Energy Group Ningxia Coal Industry Co., Ltd. Qingshuiying Coal Mine, Yinchuan 751400, China

3 Gansu Provincial Key Laboratory of Oasis Resources, Environment and Sustainable Development, Lanzhou 730000, China

Abstract: Glaciers are main factors affecting climate change. SAR (synthetic aperture radar) not only has the characteristics of high spatial resolution and multi-polarization, but also is sensitive to changes in dielectric constant caused by ice and snow melting. It has become an important data source for monitoring the ablation changes of mountain glacier

基金项目: 国家自然科学基金项目(42361058, 41871277)

收稿日期: 2022-11-01; **网络出版日期:** 2023-08-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyl0322@nwnu.edu.cn

surfaces. Based on the Sentinel-1 time series data, this paper proposes a glacier surface ablation monitoring method based on multi-temporal and multipolar SAR change detection algorithm and Sigmoid function. Taking Laohugou No. 12 glacier in Qilian Mountain as the research area, 64 transects in the east and west branches of the glacier obtained by the “centerline-circle” method were firstly used, and 7 typical transects and the glacial retreat periods in 2019 and 2020 were determined by the SAR backscatter coefficient change characteristics of 124 time phases from 2019 to 2020. Then, based on the comparison of the reference image of the same track with the multi-temporal snowmelt image, the VV (vertical vertical) and VH (vertical horizontal) polarization backscattering coefficients of the change monitoring images were obtained, respectively, and the wet snow pixels were extracted after the weight combination was combined. Finally, the Sigmoid function was used to extract dry snow combined with the average altitude of wet snow, so as to obtain the distribution of dry and wet snow on the glacier surface in 16 time phases during the two-year glacial melting period. The accuracy of the extraction results was verified by using the UAV (Unmanned Aerial Vehicle) DOM (digital orthophoto map) on September 1, 2019 and the five Sentinel-2 images of the adjacent date of Sentinel-1, and the error results were analyzed in depth based on the temperature and precipitation data of the meteorological site on the glacier. Experimental results show that this method can effectively extract the distribution of dry and wet snow on the glacier surface, and the overall classification accuracy OA (overall accuracy) is as high as 96%, and the kappa coefficient is as high as 0.84. There are interannual variations in the melting period and melting characteristics in Laohugou No. 12 glacier. The melting period of glaciers in 2019 was from early May to mid-to-late September, and the melting period in 2020 was from mid-to-late June to early September. Starting from the melting season in 2019, the dry snow area on the glacier surface decreased rapidly, while the wet snow and glacial ice area were large during the entire melting period, but with the emergence of heavy snowfall, the dry snow area increased sharply. In 2020, the glacial ice and wet snow area changed significantly, the glacier ice area continued to increase, the wet snow area continued to decrease, and the dry snow area tended to be stable at high altitude.

Key Words: multipolarization SAR; backscattering coefficient; multi-phase multipolarization change detection; glacial ablation period

冰川是全球气候变化的重要指示器,是干旱区重要的淡水资源^[1-2],实时准确地监测冰川表面消融变化对周边区域气候变化监测、生态治理和水资源调节至关重要。山地冰川多分布于偏远的高寒地区,由于复杂地形和恶劣的气候条件,依靠传统的花杆测量等地面测量方法,无法对冰川的消融状况进行大范围、长时间序列观测。自 20 世纪 70 年代以来,科研人员基于冰川/积雪在可见光/近红外波段高反射而在短波红外波段(1.6 μm)低反射特性,广泛使用 Landsat、AVHRR 和 MODIS 等传感器各波段的比值/差值运算、积雪指数(NDSI)等方法获得冰川面积及长度变化,从而用于冰川整体消融(退缩)变化等研究^[3-5]。贾伟等^[6]为了研究冰雪消融区岩漠变化,基于 Landsat TM/OLI 影像结合气象站点数据,综合应用冰雪覆盖叠加分析法和夏季末雪线法确定冰雪消融区。然而,目前直接利用光学遥感进行冰川表面消融的研究较少,其监测存在困难:(1)冰/雪具有相似的光谱特性,将两者区分存在较大不确定性^[7];(2)遥感影像对干雪与液态水含量较高的湿雪不敏感;(3)山地冰川光学信号受云、雾等大气因素影响较大。

微波遥感克服了受大气条件影响的不足,对冰雪融化引起的介电常数变化较为敏感^[8],无疑成为冰川表面消融变化监测的重要数据源。但被动微波遥感空间分辨率低(10—25 km),难以满足小尺度冰川表面消融监测的研究^[9],而主动微波遥感,如合成孔径雷达 SAR(米级)不仅具有全天候全天时的对地观测能力,而且记录的回波信号对地表粗糙度、湿度等参数信息十分敏感,可以有效监测冰川表面消融变化^[10]。在遥感发展初期,众多学者对 SAR 后向散射系数与湿雪的关系进行了探讨^[11-13]。Ulaby 等^[14]利用散射计对积雪后向散射系数进行观测,结果表明后向散射信号与积雪含水量之间存在负相关,积雪液态水含量增加使其介电常数虚部大幅增加,从而导致后向散射系数降低。Mätzler^[15]研究发现,SAR 后向散射信号因湿雪降低,可有效区

分湿雪与干雪及无雪地表,但干/湿雪分类精度依赖于后向散射系数阈值确定^[16-17]。有些研究综合利用光学遥感与微波遥感各自优势,利用 SAR 提取湿雪,基于多光谱数据波段比或 NDSI 方法提取积雪覆盖范围,从而得到冰川表面干湿雪分布^[18-19]。但这些方法一方面由于冰川区域冰川冰和冰川雪具有相似的光学特性,冰川雪精确范围提取存在困难;另一方面由于引入的 SAR 与光学遥感数据时空分辨率不一致等问题,从而为冰/雪消融变化监测带来较大的不确定性。由于微波具有极化特性,在垂直方向和水平方向呈现不同的散射特性,极化 SAR 能够获得更丰富的目标地物信息。有些学者利用极化 SAR 的目标分解与监督分类方法研究冰川表面消融,Huang 等^[20]将极化 SAR 目标分解特征(Pauli 分解、H/A/ α 分解、后向散射系数)与 SVM 方法相结合,将冰川区分为湿雪、冰川冰等六类。Singh 等人^[21]结合不同极化 SAR 的后向散射系数与极化分解模型,发展了一种基于极化系数(PF)的监督分类方法有效获取冰川消融区。但该方法目标特征分解的构建较为复杂,且分类结果质量依赖于特征目标提取。

近年来,随着 SAR 卫星数据的日益丰富以及多时相变化检测算法日渐成熟,众多科研人员致力于多时相多极化 SAR 数据冰/雪消融监测研究^[22]。Rott 和 Nagler^[23]首次利用多时相 ERS-1/2 SAR 数据变化检测法,通过计算融雪影像与同轨道未融雪影像(参考影像)的比值/差值,基于阈值分割方法得到了山区积雪消融分布图。Nagler 和 Rott^[24]引入卫星局地入射角对该算法进行了改进,并采用-3 dB 阈值对融雪与山区其他地表进行分离,提高山区积雪消融监测精度。但由于 C 波段的波长远大于干雪粒径尺寸,SAR 数据对干雪的后向散射回波较弱^[25-26],该方法无法直接识别干雪。有学者发现,干湿雪混合像元效应对积雪后向散射有影响,通过引入 Sigmoid 函数计算像元中湿雪概率,并考虑海拔高度能够有效识别复杂地表覆盖区域的干湿雪^[27-29]。孙少波等^[30]基于 ENVISAT-ASAR C 波段 VV 极化以及 DEM 数据,综合利用多时相变化检测算法与 Sigmoid 函数,获得整个流域干湿雪分布图。然而在地形陡峭区域,Nagler 等^[31]发现 VV 极化提取湿雪灵敏度会降低,尤其在局地入射角较小时,干/湿雪可分性显著降低,而两者在 VH 极化中差异较为明显;但在高局地入射角区域,VH 极化后向散射系数接近雷达噪声,因此提出了多时相多极化变化检测算法,将 VV 极化与 VH 极化进行极化权重组合提高山区积雪消融监测精度,但仍然无法区分干湿雪。

本文基于 DEM 和欧空局(ESA)高时空分辨率的 Sentinel-1 SAR 数据(124 个时相),综合运用多时相多极化变化检测算法和 Sigmoid 函数,通过权重组合 VV 和 VH 极化提取青藏高原北部祁连山老虎沟 12 号冰川融雪区域,将高于湿雪平均海拔高度且 Sigmoid 函数大于 10% 的像元判分为干雪。并利用 2019 年 09 月 01 日无人机数字正射影像(DOM)以及与 Sentinel-1 邻近日期 5 景 Sentinel-2 影像积雪提取结果进行精度验证,并结合气象站点数据对误差来源进行分析,发现该方法提取冰川表面的干湿雪分布精度较高,能够监测冰川表面消融变化状况。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

本文研究区为青藏高原北部的老虎沟 12 号冰川(96°32.5',39°26.4'),地处祁连山西段北坡,是祁连山区最大的山谷冰川,总面积约为 20.4 km²,长约 9.85 km。冰川区地形复杂,海拔介于 4202—5427 m 之间,由东、西两支组成,并于海拔 4560 m 处汇合(图 1)。冰川年平均气温-11.8℃,夏季平均气温超过 0℃,冬季低温且持续时间长^[32-33],降水主要集中在 5—9 月,约占全年的 85%^[34-35],是疏勒河流域重要的径流补给来源,也是我国西北干旱区重要的“天然水库”^[36]。冰川上安装两个自动气象站点,其中架设在消融区自动气象观测站 AWS 的经纬度为 96°32'6.1" E,39°28'32.2" N,海拔在 4550 m 附近。

为了便于分析冰川表面消融状况时空特征,本文采用“中心线—圆”方法在冰川表面采集了冰川东、西支中心线^[37],然后沿该线以 300 m 为间隔生成 64 个直径为 30 m 的圆作为样本区,其中,东支为 1—33₁样区,西支为 9₂—31₂样区。同时,根据冰川地形及消融状况,特别选取了 7 个典型样区 A、B1、C1、D1、B2、C2、D2 用于分析冰川表面消融特征,如图 1 所示。

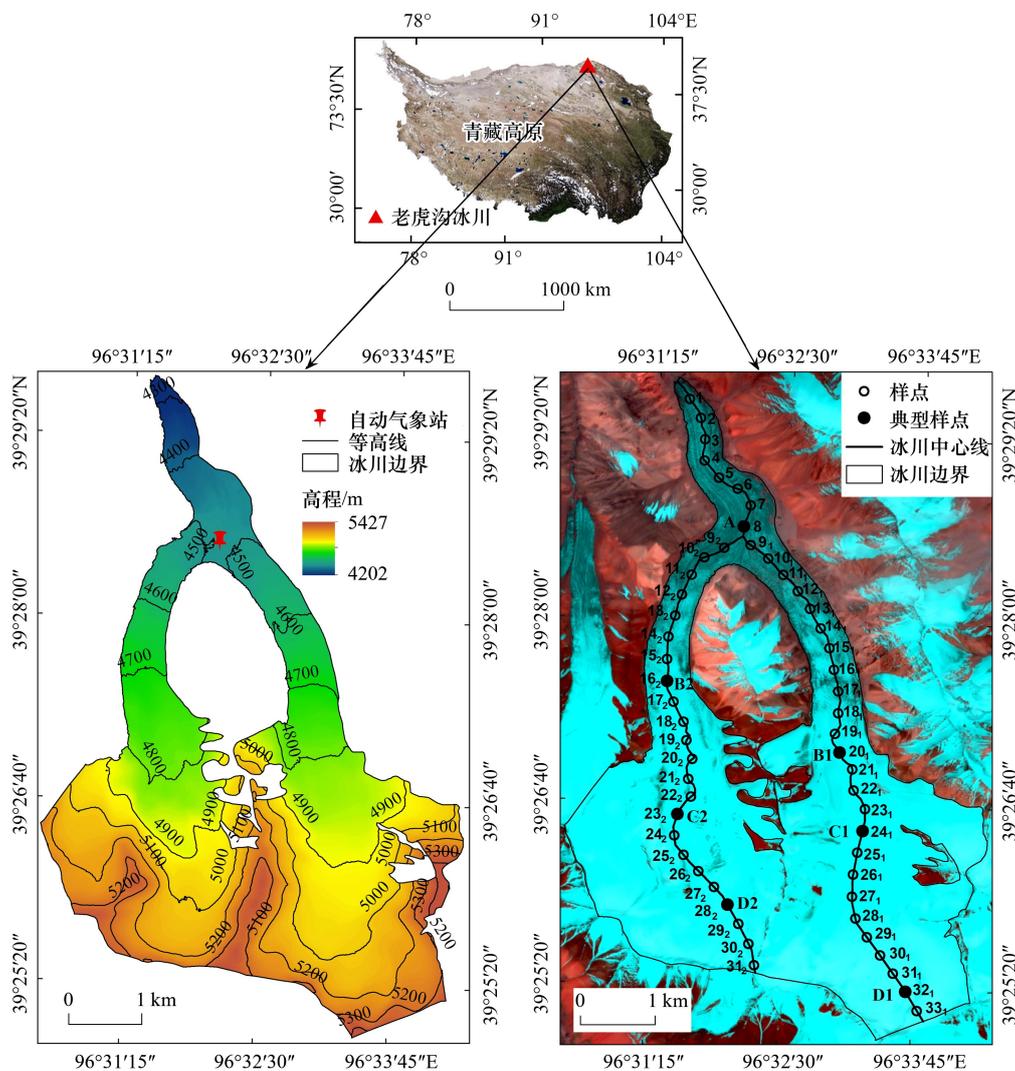


图1 老虎沟12号冰川概况

Fig.1 Overview of Laohugou No. 12 glacier

1.2 实验数据集

如表1所示,本研究所用的数据源包括五种: Sentinel-1 A (S1) 及精密轨道数据、Sentinel-2 A/B (S2)、DEM、无人机 DOM 以及气象站点数据。(1) 获取 2019—2020 年 124 景(时相) Sentinel-1A IW 成像模式 SLC 级产品降轨 SAR 数据(VV、VH 极化方式), 距离分辨率为 5 m, 方位分辨率为 20 m。经过多视处理(多视数: 方位向 1×距离向 3)后得到制图分辨率为 12.5 m 的结果。同时, 为了提高 SAR 数据定位精度, 获取 21 d 后官方网站提供的精密轨道数据 AUX_POEORB(精度在 5 cm 内)。(2) Sentinel-2 L2A 产品是经大气校正后的地表反射率产品, 用于 SAR 干/湿雪分布结果精度验证。其中, S1 和 S2 产品来自于欧洲委员会(EC) 和欧洲航天局(ESA) 共同提出的“哥白尼”项目。(3) 12.5 m TanDEM 数据用于 SAR 数据地形校正、样区海拔提取以及 SAR 多时相变化检测算法辅助数据, 该数据来自德国航天航空数据中心(DLR)。(4) 2019 年 09 月 01 日利用华测华鹤复合翼 P330 无人机对老虎沟冰川进行航空摄影, 获得 10 cm DOM, 用于结果精度验证数据。(5) 站点气温和降水数据用于冰川消融状况分析的辅助分析数据和佐证资料, 由中科院西北生态环境资源研究院祁连山冰川与生态环境综合观测研究站提供。此外, 一景 Sentinel-1 与 Sentinel-2 影像可以完全覆盖该冰川, 因此本文统一用时相来描述 Sentinel-1 与 Sentinel-2 影像的数量。

2 原理与方法

通常,冰川表面覆盖类型被分为冰川冰(裸冰)、冰川雪(包括干雪和湿雪)、冰碛物以及冰川湖/河等^[18,20]。由于老虎沟 12 号冰川湖/河、冰碛物面积较小,因此本文在监测冰川雪消融变化时将两种类型忽略而不予考虑。同时,尽管利用 DEM 对 SAR 数据进行了地形校正预处理,但在陡峭区域仍然存在叠掩和阴影像元,需要通过 DEM 数据获得 SAR 局地入射角,然后对这两类像元进行掩膜处理。所以,为了监测冰川雪的消融变化,本文将冰川表面分为四种类型:湿雪、干雪、冰川冰和掩膜区。首先通过多时相多极化变化检测算法提取冰川表面湿雪,然后利用 Sigmoid 函数以及 DEM 数据获得干雪像元,最后将剩余部分划分为冰川冰,并利用无人机 DOM 和 Sentinel-2 光学影像,以及气温与降水气象站点观测数据对冰川表面覆盖类型进行精度验证与误差分析,其技术流程如图 2 所示。

表 1 数据基本信息

Table 1 Basic data information

数据集名称 Dataset name	空间分辨率 Spatial resolution	数据量/时间 Data quantity/time	数据/设备来源 Data/device sources	用途 Application
哨兵-1A 及精密轨道数据 Sentinel-1A and precision orbit data	5 m (距离向)×20 m (方位向)	2019 年 61 景 2020 年 63 景	ESA (https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home)	消融变化分析
哨兵-2 Sentinel-2	10 m	5 景		SAR 分类精度验证
TanDEM DEM	12.5 m	—	DLR (https://geoservice.dlr.de/web/dataguide/tdm90/)	地形校正、配准、 样区提取
无人机数字正射影像 UAV DOM	0.1 m	2019 年 09 月 01 日 1 景	上海华测导航技术股份有限公司 (华测)	SAR 分类精度验证
气温和降水 Temperature and precipitation	—	2019—2020 年部分 数据	中科院西北生态环境资源研究院	辅助分析

DOM:数字正射影像;DEM:数字高程模型

2.1 基于多时相多极化变化检测算法的湿雪提取

冰川雪中液态水使介电常数增加,SAR 后向散射信号急剧下降^[38]。本文基于这一散射特性使用多时相多极化变化检测算法提取冰川表面湿雪,将不同时相融雪影像后向散射系数与同轨道参考影像(未融雪影像)差值小于-2 dB 作为冰川雪消融判断条件。主要包括以下四个步骤:

(1) 首先对 SAR 数据进行掩膜和去噪处理。山区复杂地形对 SAR 影像产生畸变,叠掩使得坡顶微波回波信号先到达而坡底信息后到达,从而在 SAR 影像上产生顶底倒置现象;同时 SAR 传感器接收不到背向斜坡回波信号,在影像上产生雷达阴影,无法获得积雪信息。尽管在数据预处理时,基于高分辨率 DEM 对 SAR 数据进行了地形校正,但在地形陡峭区域叠掩与阴影像元依然存在,严重影响冰川雪消融变化监测研究。如当 SAR 局地入射角接近 0°时会产生叠掩像元,或当局地入射角接近 90°时,将产生阴影区;同时研究发现,在极端照射条件下(如局地入射角小于 18°,大于 78°),利用 SAR 后向散射系数无法可靠地识别湿雪信息^[24]。因此,本文将局地入射角 θ 小于 18°和大于 78°区域进行掩膜处理。此外,对 VV 极化后向散射系数小于-20 dB, VH 极化后向散射系数小于-24 dB 大于-30 dB 做去噪处理,可以有效地去除 Sentinel-1 数据的系统噪声^[39]。掩膜区及去噪算法如式(1)所示,式中, σ_{VV} 与 σ_{VH} 分别为 VV 和 VH 极化的后向散射系数。

$$\begin{cases} IF(\theta < 18^\circ \text{ and } \theta > 78^\circ) \rightarrow \text{掩膜} \\ IF(\sigma_{VV} < -20 \text{ dB and } -30 \text{ dB} < \sigma_{VH} < -24 \text{ dB}) \rightarrow \text{去噪} \end{cases} \quad (1)$$

(2) 变化检测影像后向散射系数计算。将多个时相的融雪影像与同轨道参考影像的后向散射系数做差,得到变化检测影像的后向散射系数如式(2)所示。

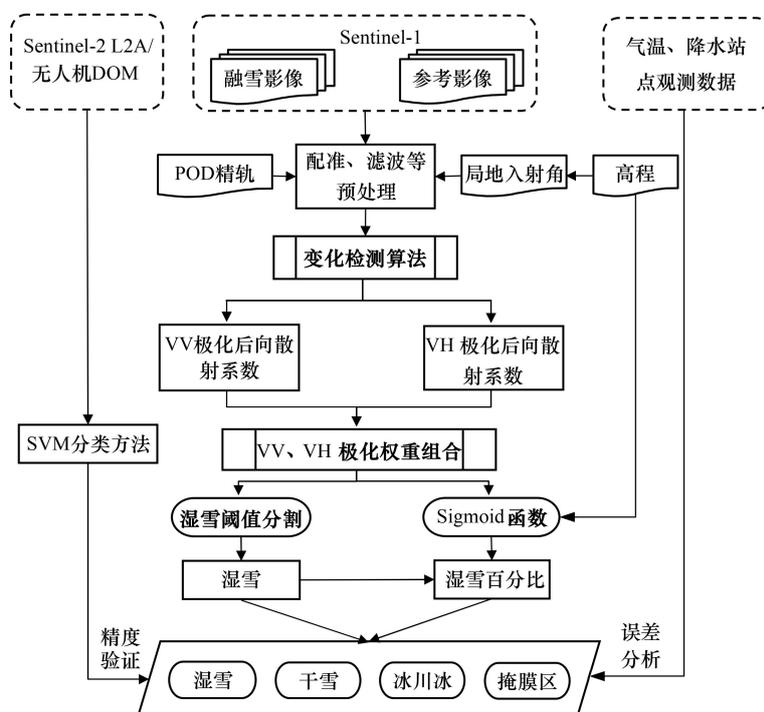


图2 多时相多极化变化检测算法监测冰川消融流程图

Fig.2 Flow chart of monitoring glacier ablation with multi-temporal multi-polarization change detection algorithm

POD:精密定轨星历数据;SVM:支持向量机;VV:垂直垂直;VH:垂直水平

$$R = \sigma_{ws} - \sigma_{ref} \quad (2)$$

式中, σ_{ws} 、 σ_{ref} 分别为融雪影像和参考影像的后向散射系数, R 为变化检测影像后向散射系数。同时,为了抑制后向散射随时间变化的影响以及减弱 SAR 散斑噪声,一般选择与融雪影像相同成像模式的多个时相无雪/干雪影像后向散射系数均值作为参考影像。由于在冰川区域没有完全无雪和干雪全覆盖的影像,因此结合气温与降水数据选择冰川积累期影像(近似被干雪覆盖)作为参考影像。另外,在地形陡峭地区,SAR 交叉极化对同极化提取湿雪灵敏度降低有补偿作用^[31],因此为了提高湿雪提取精度,分别计算融雪影像与参考影像 VV 极化与 VH 极化后向散射系数之差,将变化检测影像 VV 极化与 VH 极化后向散射系数记为 R_{VV} 与 R_{VH} 。

(3) 将 VV 和 VH 极化后向散射系数进行权重组合。在得到变化检测影像后向散射系数后,对其进行权重组合,如式(3):

$$R_c = WR_{VH} + (1 - W)R_{VV} \quad (3)$$

式中, R_c 为权重组合的后向散射系数, W 为权重系数,其值由 Nagler 等^[31]定义的局地入射角 θ 计算得到,如式(4)所示。即,当 $\theta < 20^\circ$ 时 VH 极化对湿雪更为敏感,将其权重赋值为 1,而 R_{VV} 权重为零;当 $20^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ 时,两类极化的权重系数赋值随三个角度的变化而变化;当 $\theta > 45^\circ$ 时 R_{VV} 与 R_{VH} 具有相同的权重,即两者权重系数均为 0.5。其中, K 设置为 0.5, θ_1 和 θ_2 为局地入射角的上下界,分别设置为 20° 和 45° 。

$$\begin{cases} IF(\theta < \theta_1) \rightarrow W = 1.0 \\ IF(\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2) \rightarrow W = K \left[1 + \frac{(\theta_2 - \theta)}{(\theta_2 - \theta_1)} \right] \\ IF(\theta > \theta_2) \rightarrow W = K \end{cases} \quad (4)$$

(4) 湿雪提取。研究表明采用传统 -3 dB 阈值会明显低估湿雪覆盖范围, -2 dB 阈值更适合湿雪面积参数提取^[40]。本文经多次实验发现 -2 dB 阈值能够更好地判别湿雪。

2.2 基于 Sigmoid 函数的干雪提取

由于空气与干雪的介电常数相近,微波容易穿透,因此无法使用多时相多极化 Sentinel-1 数据直接识别冰川表面干雪。有些研究利用 Sigmoid 函数分析干/湿雪混合像素的后向散射特性与湿雪含量关系基础上,提出干雪分类方法^[27-30]。本文在上一步使用多时相多极化变化检测算法提取湿雪基础上,利用 DEM 数据计算湿雪像元的平均海拔高度,然后根据变化检测影像 VV 和 VH 极化权重组合后向散射系数 R_c , 获得像元湿雪百分比 $F(R)$ 。在此基础上加入大于平均湿雪海拔与像元湿雪百分比大于 10% 的限定条件提取了干雪覆盖范围。因此,本研究采用 Strovolid 等^[28] 提出干雪提取方法,根据式(5)将大于平均湿雪海拔 h , 且 $F(R)$ 大于 10% 的像元判分为干雪像元。其中, a 取常量 0.3^[28]。

$$F(R) = 50 - 50 \tanh[a(R_c + 3)]\% \tag{5}$$

3 结果与分析

3.1 冰川表面干湿雪分类精度评价

本文使用无人机 DOM 和 Sentinel-2 影像对综合应用多时相多极化 SAR 变化检测算法和 Sigmoid 函数的分类结果进行精度评估,评价指标包括总体分类精度(OA)、错分误差(CE)、漏分误差(OE)和 Kappa 系数。2019 年 9 月 1 日对冰川进行了实地考察并使用华测华鹞复合翼 P330 无人机进行航空摄影,得到 10 cm DOM 数据(因南部区域高差大且广泛分布高反射冰川雪使得影像匹配存在困难等因素未能获得全流域 DOM)。如图 3 所示,选择 4 个样区(海拔均在 4900 m 以下)对 SAR 分类结果进行验证。经实地考察发现,样区内只有冰川冰和湿雪两类,并且通过支持向量机分类(SVM)提取 4 个样区的冰川雪和冰川冰,结果表明其与 SAR 变化检测算法和 Sigmoid 函数的分类结果具有较高一致性,如表 2 所示。统计结果表明,本文基于 SAR 提取的冰川冰与湿雪精度较高;4 个样区的 OA 均大于 90%;Kappa 系数为 0.75—0.84;样区 B 和样区 C 的 Kappa 系数均大于 0.80。

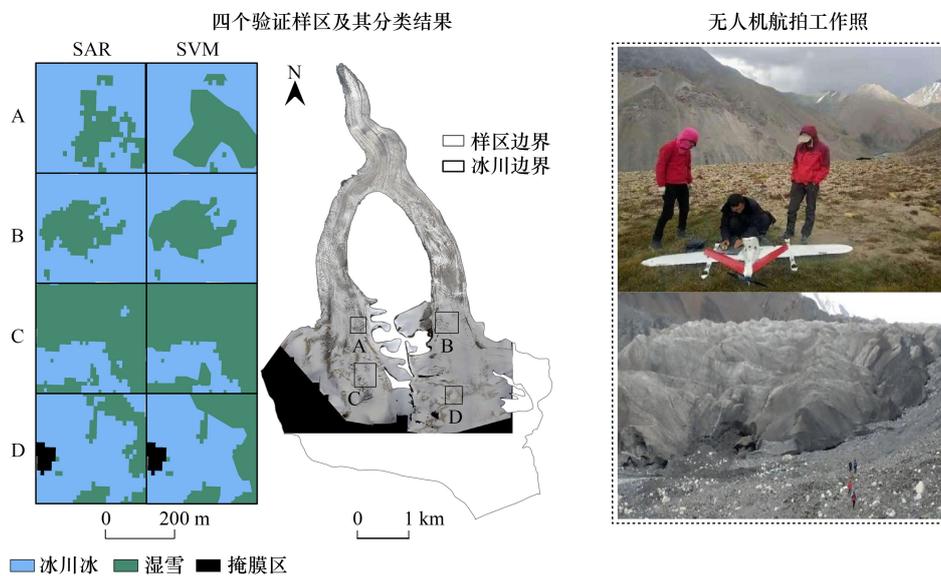


图 3 基于 SAR 和无人机 DOM 的冰川表面分类结果对比

Fig.3 Comparison of glacier surface classification results based on SAR and UAV DOM

SAR: 合成孔径雷达; DOM: 数字正射影像

为了进一步验证基于 SAR 数据的冰川表面干/湿雪监测精度,筛选与 Sentinel-1 同天或邻近日期的 5 个时相晴空 Sentinel-2 L2A 影像进行 SVM 分类。由于光学影像不易于区分干/湿雪信息,因此将冰川表面覆盖类型区分为冰川冰和冰川雪。图 4 为 2019 年 9 月 2 日基于 Sentinel-1 提取的冰川表面覆盖类型与前一日

(9月1日)基于 Sentinel-2 分类结果对比图。其中,在 Sentinel-2 真彩色影像上冰川雪呈白色,而冰川冰呈暗色调。可以看出,综合多时相多极化 SAR 变化检测算法与 Sigmoid 函数能较合理地反映冰川表面覆盖类型分布特征,所提取的冰川冰和冰川雪分布与 Sentinel-2 分类结果基本一致。将 Sentinel-2 解译结果作为“真值”,对 SAR 提取结果构建混淆矩阵(表 3)。5 个时相分类结果对比发现,本文提出的方法能够有效监测冰川雪消融变化,除了 2020 年 08 月 26 日 Kappa 系数等统计指标较低外,其余 4 个时相的两类数据分类结果较为一致。但表 3 所示的后三个时相的总体精度、错分误差、漏分误差等精度不高,可能是由 Sentinel-1 与 Sentinel-2 卫星过境时间存在差异引起的。2019 年 7 月 16 日和 7 月 28 日数据是同一天获取,而后三个时相数据获取时间相隔一天。即便是同一天过境,两颗卫星过境时刻存在约 5 小时差异, Sentinel-2 卫星正午 12 时左右过境,而 Sentinel-1 在上午 7 点左右过境。

表 2 分类精度评估参数

Table 2 Classification accuracy evaluation parameters

样区 Sample area	整体精度 OA/% Overall accuracy	错分误差 CE/% Commission error	漏分误差 OE/% Omission error	Kappa 系数 Kappa coefficient
A	90	3	34	0.75
B	96	2	9	0.84
C	91	17	5	0.80
D	91	8	35	0.78

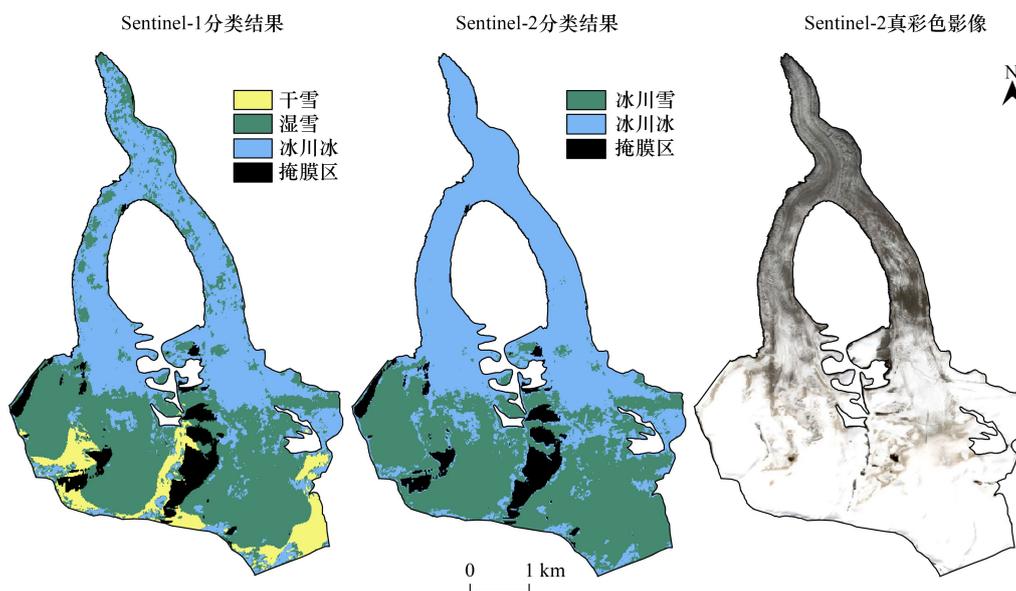


图 4 基于 Sentinel-1 提取的 2019 年 9 月 2 日冰川表面分类与 9 月 1 日 Sentinel-2 分类结果对比

Fig.4 Comparison between the classification results of the glacier surface extracted on September 2, 2019 based on Sentinel-1 and the classification results of Sentinel-2 on September 1

3.2 基于 SAR 后向散射系数的干湿雪时序变化

SAR 后向散射系数是冰川消融变化监测的基础,随着气温上升冰川雪开始消融,湿雪表层后向散射系数明显降低 5—10 dB^[38-39,42]。因此,本文首先利用 2019—2020 年 124 个时相的 Sentinel-1 后向散射系数监测冰川表面消融时空变化特征。为了便于分析,利用“中心线—圆”法在老虎沟 12 号冰川东、西支共获得 64 个直径为 30 m 样区,将区内所有像元后向散射系数的平均值作为该样区的后向散射系数,其 VV 极化时序变化曲线如图 5 所示。结果发现,后向散射系数变化特征随高程而变化,出现明显分层现象。因此,如图 1 所示,选择了 7 个典型样区(A、B1、B2、C1、C2、D1 和 D2),根据其后向散射系数时序变化曲线进一步探讨冰川表面消融分异规律。

表 3 五个典型时相的 SAR 冰川表面分类结果精度验证

Table 3 Accuracy Verification of SAR Glacier Surface Classification Results in Five Typical Phases

Sentinel-2 影像 (真值) Sentinel-2 image (truth value)		Sentinel-1 影像 Sentinel-1 image			
		冰川雪像元数 Glacier Snow Pixels		冰川冰像元数 Glacier Ice Pixels	
2019-07-16	冰川雪像元数	101767		5000	
	冰川冰像元数	5390		21339	
		OA = 92%	CE = 20%	OE = 4%	Kappa = 0.77
2019-07-28	冰川雪像元数	46261		5453	
	冰川冰像元数	10774		71008	
		OA = 88%	CE = 13%	OE = 10%	Kappa = 0.84
2019-08-10	冰川雪像元数	60040		14318	
	冰川冰像元数	11289		47849	
		OA = 81%	CE = 19%	OE = 19%	Kappa = 0.69
2019-09-01	冰川雪像元数	60590		12701	
	冰川冰像元数	11405		48800	
		OA = 82%	CE = 19%	OE = 17%	Kappa = 0.71
2020-08-26	冰川雪像元数	54216		24308	
	冰川冰像元数	10229		44743	
		OA = 74%	CE = 18%	OE = 30%	Kappa = 0.56

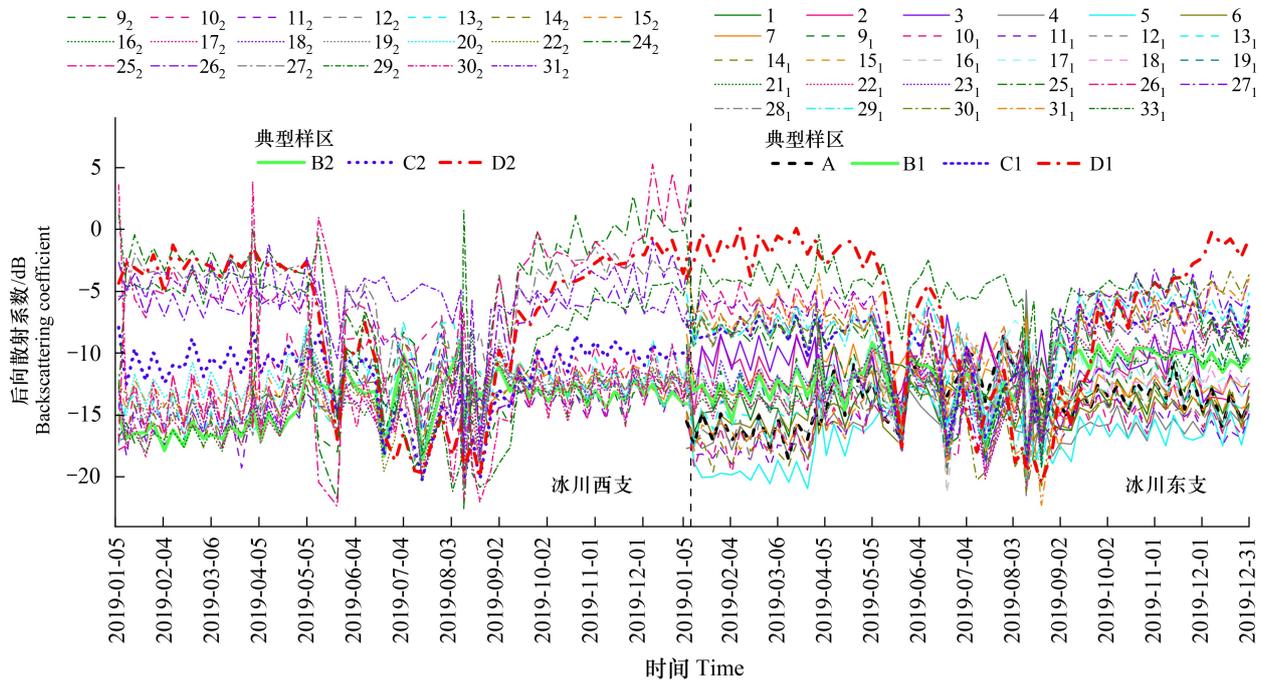


图 5 冰川东西支 64 个样区 VV 极化后向散射系数在 2019 年的时序变化曲线对比

Fig.5 Comparison of time-series variation curves of VV polarization backscattering coefficients at 64 sampling points in the east and west branches of glaciers in 2019

A、B1、C1、D1、B2、C2 和 D2 表示不同高程的 7 个典型样区,其相应的位置见图 1

图 6 是 7 个典型样区的后向散射系数随时间序列的变化曲线。结果发现,SAR 后向散射系数随时间而变化,且变化趋势随高程不同而有较大差异;高程较大的 C1、C2、D1 和 D2 点的后向散射系数在 1—5 月较大且波动较小,但在 6—8 月急剧下降约 5—10 dB,表明冰川表面消融剧烈,9 月开始又急剧增加;而高程较小的 A、B1 和 B2 点的后向散射系数在全年波段减弱。不难看出,VH 极化后向散射系数比 VV 极化低 5—10 dB,

但两种曲线变化趋势相似,且 VV 极化波动范围更大,对冰川雪消融变化更为敏感性。同时,两种极化 SAR 后向散射系数变化曲线具有年际差异,2019 年冰川东西支后向散射系数在 5 月初至 9 月中下旬较低,而 2020 年急剧下降开始于 6 月中下旬至 9 月初。因此,老虎沟 12 号冰川 2019 年的消融期可以确定为 5 月初至 9 月中下旬,2020 年消融期为 6 月中下旬至 9 月初。

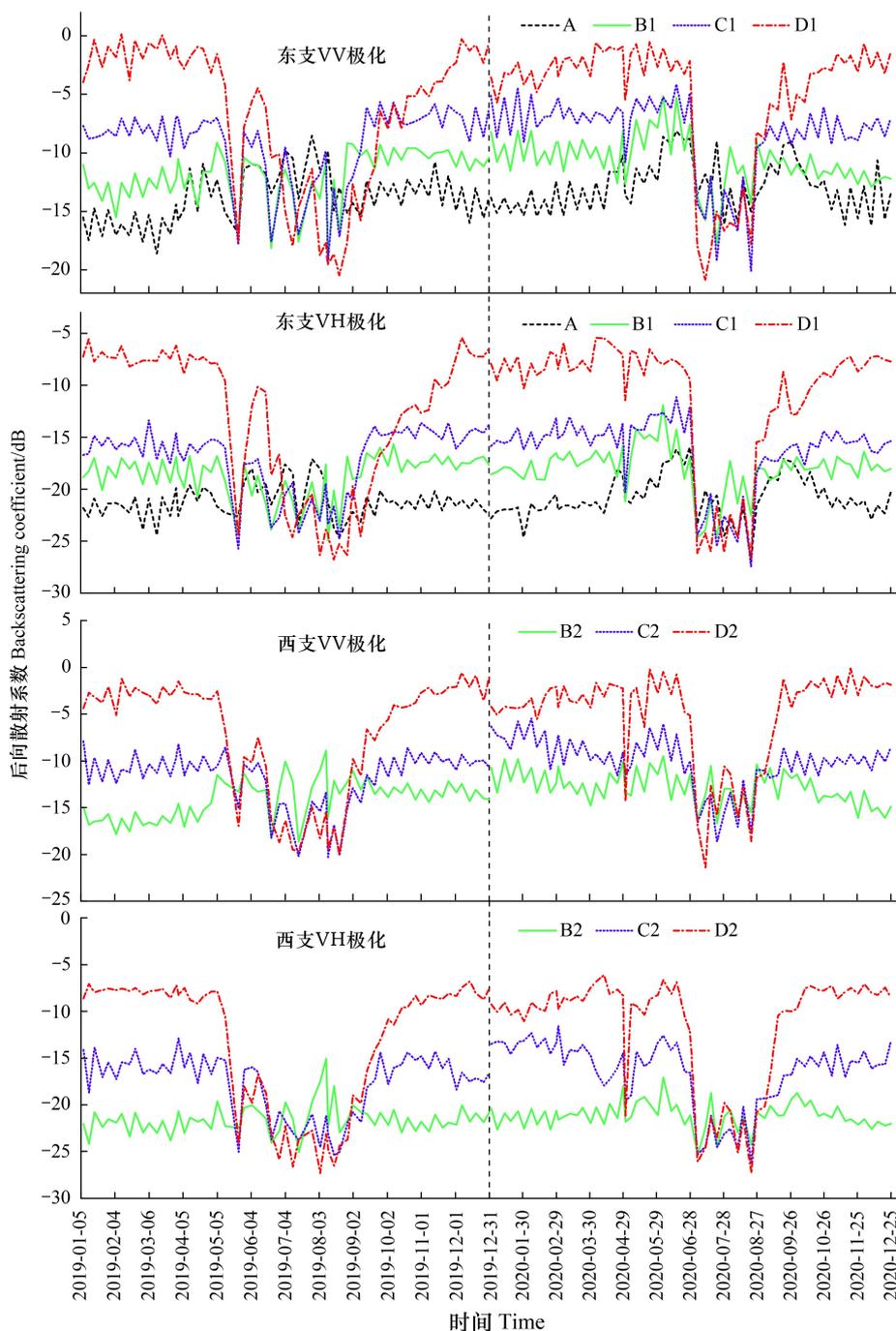


图 6 典型样区在 2019—2020 年 VV、VH 极化后向散射系数时序变化曲线对比

Fig. 6 Comparison of time-series change curves of VV and VH polarization backscatter coefficients for typical samples in 2019—2020

为了进一步分析两年消融期内冰川东西支表面变化特征,结合气象站点气温和降水观测数据对典型样区 VV 极化后向散射系数进行分析,如图 7 所示。实验发现各样区 VV 极化后向散射系数在 2019 年和 2020 年消融期内剧烈波动,与温度呈反向变化趋势,温度升高冰川雪消融越剧烈,使得后向散射系数急剧下降,如

2019 年 5 月 24 日、6 月 22 日以及 2020 年 7 月 12 日、7 月 22 日和 8 月 22 等日。同时,其变化曲线也随固态降水(降雪)而出现较大波动,随着降雪的发生,冰川表面干雪增加,后向散射系数骤然升高,如 2019 年 5 月 29 和 6 月 10 日。然而,由于 Sentinel-1 过境时间在上午 7 点左右,不能完全监测到当日冰川上新降雪信息,使得 SAR 后向散射系数陡然增大节点产生延后错位现象,如 2019 年 8 月 21 和 2020 年 8 月 22 等日。

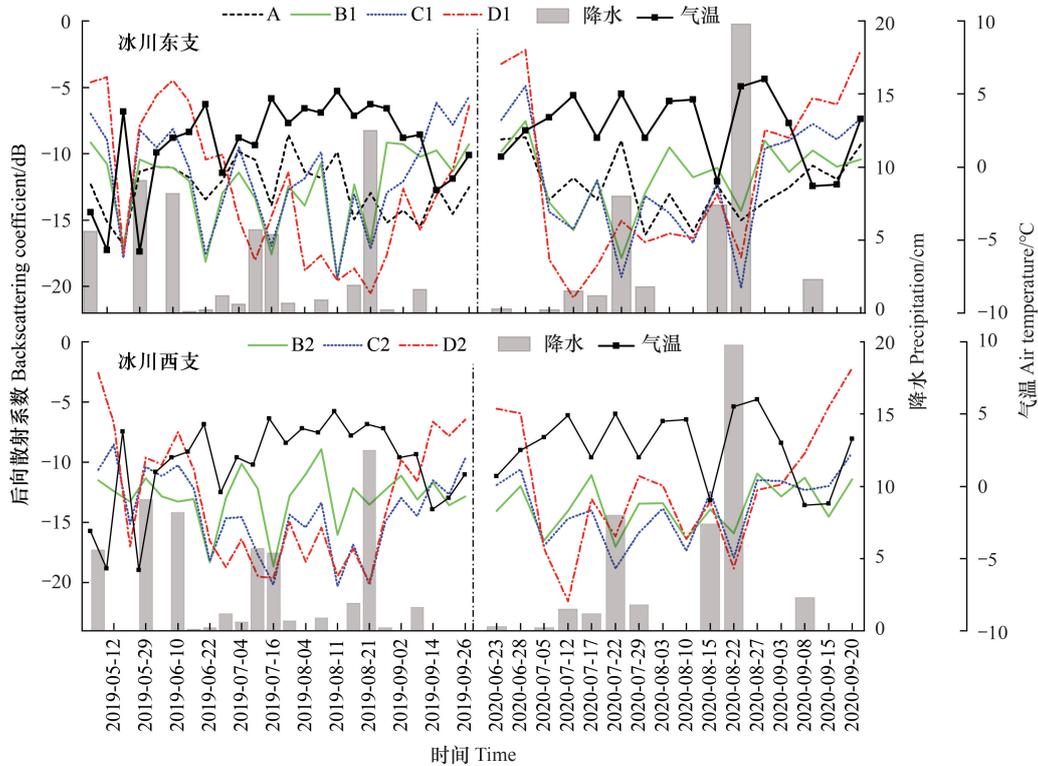


图 7 典型样区在消融期 VV 极化后向散射系数时序变化曲线及对应时期气温变化柱状图

Fig.7 Time-series change curve of VV polarization backscatter coefficient and histogram of temperature change in the corresponding period of typical sample points during the ablation period

3.3 消融期冰川表面干湿雪时空变化特征

以上结果表明,VV 极化后向散射系数能够监测冰川表面消融状况,但仍然无法区分干湿雪像元,因此需要综合利用多时相多极化变化检测算法和 Sigmoid 函数获得消融期干湿雪时空变化特征。选择 2019 年消融期 10 个时相和 2020 年消融期 6 个时相的 Sentinel-1 IW1 成像模式降轨数据,提取冰川表面干雪与湿雪,如图 8 所示。可以看出干湿/雪像元空间分布随时间而剧烈变化,且湿雪集中分布在冰川东西两支汇合口以上的区域,干雪分布在冰川末端高海拔区域。在两个消融期湿雪均呈先增加再持续减小的趋势,而干雪在 2019 年呈先减小再增加的趋势,在 2020 年干雪呈先增加后趋于稳定趋势。

图 9 统计了两个消融期 Sentinel-1 卫星过境时刻冰川冰、干/湿雪面积变化直方图,可以看出三类面积变化还受气温与降水影响而出现较大波动,且消融期各类面积变化规律具有较大的年际差异:2019 年从消融季开始,冰川表面干雪面积迅速减小,而湿雪与冰川冰面积在整个消融期均较大,但随着强降雪出现,干雪面积骤然上升(如 2019 年 8 月 21 日),随后由于冰川消融干雪面积逐渐减小;2020 年冰川冰和湿雪面积变化明显,冰川冰面积持续增加,湿雪面积持续减小,而干雪面积在高海拔区趋于稳定。

本文综合利用多时相多极化变化检测算法和 Sigmoid 函数将冰川表面分为四种类型:湿雪、干雪、冰川冰和掩膜区。为了进一步分析 2019 和 2020 年消融期冰川表面覆盖类型的变化特征,在图 8 所示的 16 个时相基础上提取了东西支 7 个典型样区的覆盖类型,并分别以冰川冰、湿雪和干雪为三个同心圆,以北为消融季为起点,沿顺时针方向制作了雷达图,如图 10 所示。研究发现,典型样区的覆盖类型包括五种类型:冰川冰、冰

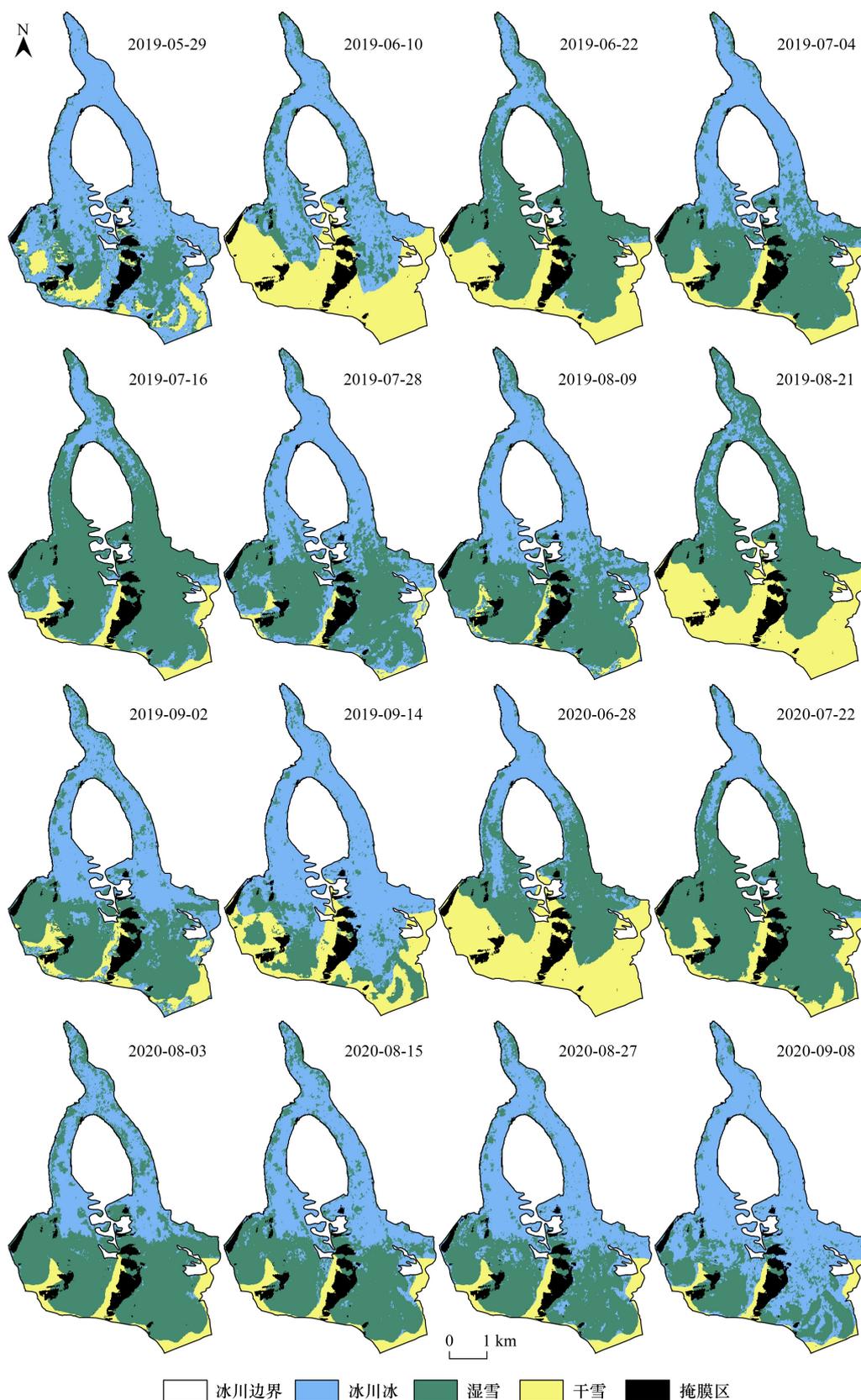


图 8 2019 年和 2020 年消融期冰川表面分类结果

Fig.8 Classification results of glacier surface during ablation period in 2019 and 2020

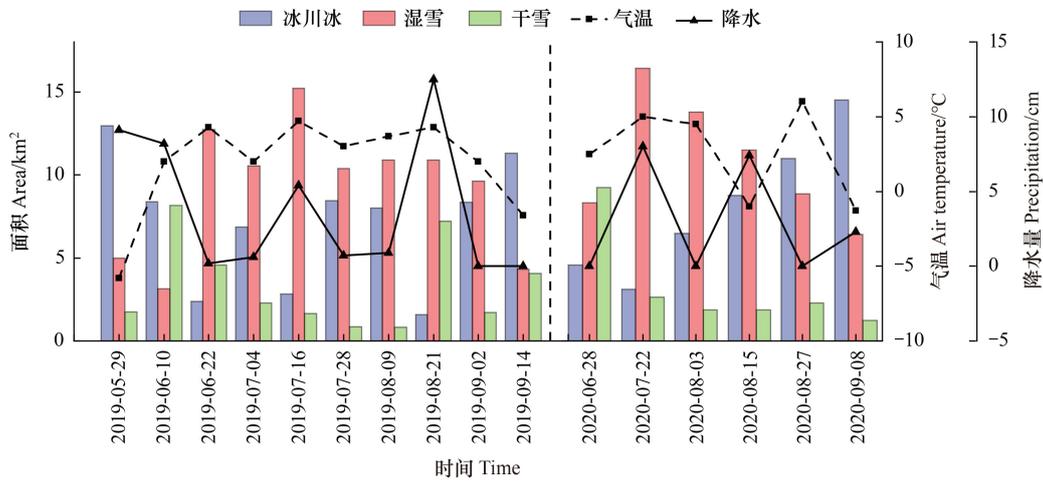


图9 2019年和2020年消融期冰川冰、干/湿雪面积变化与气温、降水站点观测数据曲线对比

Fig.9 Comparison of glacial ice and dry/wet snow area changes with temperature and precipitation station observation data curves during the ablation period in 2019 and 2020

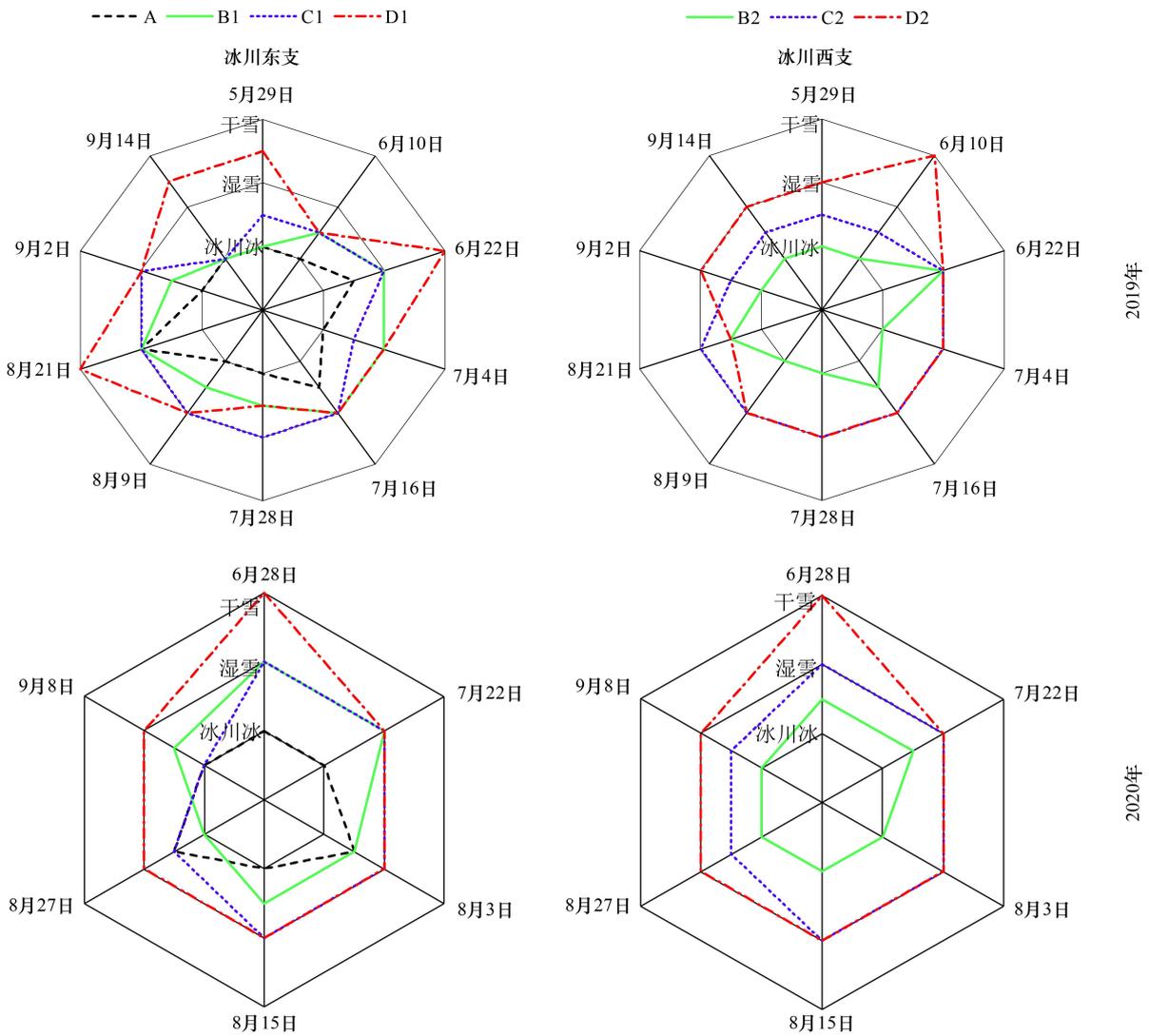


图10 七个典型样区对应的冰川冰、干/湿雪类型变化

Fig.10 Changes of glacial ice and dry/wet snow types corresponding to seven typical sampling points

川冰和湿雪、湿雪、湿雪和干雪、干雪。如果某个时相的样区为均一覆盖类型,则曲线在同心圆上,否则,如果样区覆盖类型非均质,在曲线处于两同心圆中间位置。结果表明,高程较小的 A、B1 和 B2 点由于消融期气温较高,发生降雪后样区的冰川雪将迅速消融,导致样区覆盖类型在消融期以冰川冰、冰川冰和湿雪为主,如图中黑色与绿色曲线。高程较大的 C1、C2、D1、D2 样区在消融期仍有冰川雪覆盖,但在消融末期,冰川雪消融退缩至高海拔区域,其样区的覆盖类型以冰川冰和湿雪覆盖为主,如 2020 年 8 月 27 日 C1 样区,2019 年 9 月 2 日和 2019 年 9 月 14 日的 C2 样区。此外,样区 C1 在 2019 年 9 月 14 日和 2020 年 9 月 8 日冰川雪完全消融,覆盖类型仅为冰川冰;而 D1 与 D2 样区在消融初期以干雪覆盖为主,随着气温的升高,干雪逐渐消融,样区转为以湿雪覆盖为主,如图 10 中红色曲线。

4 结论与讨论

本文基于 Sentinel-1 数据综合利用多时相多极化变化检测算法与 Sigmoid 函数,监测 2019—2020 年老虎沟 12 号冰川表面消融变化特征。首先通过 7 个典型样区的 124 个时相 SAR 后向散射系数变化特征确定了两年的冰川消融期,即 2019 年的消融期确定为 5 月初至 9 月中下旬,2020 年消融期为 6 月中下旬至 9 月初。然后基于同轨道参考影像与多时相融雪影像对比获得变化监测影像后向散射系数,在此基础上对其 VV 和 VH 极化后向散射系数进行权重组合有效提取湿雪像元。最后通过 Sigmoid 函数计算像元湿雪百分比,将高于湿雪平均海拔高度且 Sigmoid 函数大于 10% 的像元判分为干雪,从而得到冰川表面的干湿雪分布。利用无人机 DOM 数据以及与 Sentinel-1 邻近日期 5 景 Sentinel-2 影像积雪提取结果对其进行精度验证,并结合气象站点数据进行分析,研究表明该方法提取冰川表面的干湿雪分布精度较高,能够快速监测冰川表面消融时空变化特征。

然而,本方法提取的结果仍存在一定的不确定性,主要表现在以下三个方面:(1)参考图像的选择是提取湿雪的关键,为了抑制后向散射随时间变化的影响以及减弱 SAR 散斑噪声,一般选择与融雪影像相同成像模式的多个时相无雪/干雪影像后向散射系数均值作为参考影像^[31]。然而冰川没有完全无雪和干雪完全覆盖的影像,只能结合气温与降水数据选择冰川积累期影像(近似被干雪覆盖)作为参考影像。并且,若进行长时间序列监测,参考影像应该动态地选择与分析年份接近的影像。(2)虽然利用高分辨率 DEM 对 Sentinel-1 数据进行了地形校正预处理,但在地形陡峭区域仍然存在叠掩和阴影像元,本研究通过将局地入射角小于 18° 和大于 78° 区域进行掩膜处理。但该做法导致掩膜区冰川雪消融信息缺失,今后可以通过升轨与降轨影像结合的方法减少叠掩、阴影等掩膜区信息的损失。(3) Sentinel-1 降轨卫星数据在早上 7 点左右过境老虎沟 12 号冰川,该时段不是监测冰川消融变化状况的最佳时间,因为冰川雪和冰川冰在早上可能会重新冻结,这可能导致对湿雪提取的低估。另外, Sentinel-2 卫星均在正午 12 时左右过境该冰川,与提取干湿/雪时刻至少相差约 5h,消融期冰川雪在光学影像采集时刻前会快速消融变化,可能与提取结果存在一定的偏差。

参考文献 (References):

- [1] König M, Winther J G, Knudsen N T, Guneriusson T. Firn-line detection on Austre Okstindbreen, Norway, with airborne multipolarization SAR. *Journal of Glaciology*, 2001, 47(157): 251-257.
- [2] 周汉昌, 马安周, 刘国华, 庄国强. 冰川消退带微生物群落演替及生物地球化学循环. *生态学报*, 2018, 38(24): 9021-9033.
- [3] Hall D, Bayr K J, Bindschadler R, Schoener W. Changes in the pastertze glacier, Austria, as measured from the ground and space. *Proceedings of the 58th Eastern Snow Conference*, 2001: 17-19.
- [4] Sidjak R W. Glacier mapping of the Illecillewaet icefield, British Columbia, Canada, using Landsat TM and digital elevation data. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(2): 273-284.
- [5] 张宏锋, 欧阳志云, 郑华, 肖焱. 新疆玛纳斯河流域冰川生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, 2009, 29(11): 5877-5881.
- [6] 贾伟, 王静爱, 史培军, 马伟东. 青藏高原冰雪消融区岩漠动态变化遥感监测研究现状与展望. *地球信息科学学报*, 2021, 23(10): 1715-1727.
- [7] Gupta R P, Haritashya U K, Singh P. Mapping dry/wet snow cover in the Indian Himalayas using IRS multispectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(4): 458-469.
- [8] Rott H, Mätzler C. Possibilities and limits of synthetic aperture radar for snow and glacier surveying. *Annals of Glaciology*, 1987, 9: 195-199.

- [9] 曹梅盛, 李培基. 中国西部积雪微波遥感监测. 山地研究, 1994, 12(4): 230-234.
- [10] 李震, 廖静娟, 张平. 合成孔径雷达地表参数反演模型与方法. 北京: 科学出版社, 2011: 16-41.
- [11] Baghdadi N, Livingstone C E, Bernier M. Airborne C-band SAR measurements of wet snow-covered areas. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(6): 1977-1981.
- [12] Ashcraft I S, Long D G. Comparison of methods for melt detection over Greenland using active and passive microwave measurements. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(12): 2469-2488.
- [13] He G J, Feng X Z, Xiao P F, Xia Z H, Wang Z, Chen H, Li H, Guo J J. Dry and wet snow cover mapping in mountain areas using SAR and optical remote sensing data. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(6): 2575-2588.
- [14] Ulaby F T, Stiles W H, Brunfeldt D, Wilson E. 1-35 GHz microwave scatterometer. 1979 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. April 30-May 2, 1979, Orlando, FL, USA. IEEE, 2010: 551-553.
- [15] Mätzler C. Applications of the interaction of microwaves with the natural snow cover. Remote Sensing Reviews, 1987, 2(2): 259-387.
- [16] Floricioiu D, Rott H. Seasonal and short-term variability of multifrequency, polarimetric radar backscatter of Alpine terrain from SIR-C/X-SAR and AIRSAR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(12): 2634-2648.
- [17] Arigony-Neto J, Rau F, Saurer H, Jaña R, Simões J C, Vogt S. A time series of SAR data for monitoring changes in boundaries of glacier zones on the Antarctic Peninsula. Annals of Glaciology, 2007, 46: 55-60.
- [18] 张丽萍. 联合光学与 SAR 遥感数据的山地冰川表面覆盖类型识别[D]. 兰州: 西北师范大学, 2021.
- [19] Varade D, Dikshit O, Manickam S. Dry/wet snow mapping based on the synergistic use of dual polarimetric SAR and multispectral data. Journal of Mountain Science, 2019, 16(6): 1435-1451.
- [20] Huang L, Li Z, Tian B S, Chen Q, Liu J L, Zhang R. Classification and snow line detection for glacial areas using the polarimetric SAR image. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(7): 1721-1732.
- [21] Singh G, Venkataraman G, Yamaguchi Y, Park S E. Capability assessment of fully polarimetric ALOS-PALSAR data for discriminating wet snow from other scattering types in mountainous regions. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(2): 1177-1196.
- [22] Snapir B, Momblanch A, Jain S K, Waive T W, Holman I P. A method for monthly mapping of wet and dry snow using Sentinel-1 and MODIS: application to a Himalayan River Basin. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 74: 222-230.
- [23] Rott H, Nagler T. Capabilities of ERS-1 SAR for snow and glacier monitoring in alpine areas. European Space Agency-Publications-ESA SP, 1994, 361: 965-965.
- [24] Nagler T, Rott H. Retrieval of wet snow by means of multitemporal SAR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(2): 754-765.
- [25] Langley K, Hamran S E, Hogda K A, Størvald R, Brandt O, Hagen J O, Kohler J. Use of C-band ground penetrating radar to determine backscatter sources within glaciers. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(5): 1236-1246.
- [26] Liang D, Guo H D, Zhang L, Cheng Y, Zhu Q, Liu X T. Time-series snowmelt detection over the Antarctic using Sentinel-1 SAR images on Google Earth Engine. Remote Sensing of Environment, 2021, 256: 112318.
- [27] Malnes E, Gneriussen T. Mapping of snow covered area with Radarsat in Norway. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. June 24-28, 2002, Toronto, ON, Canada. IEEE, 2002: 683-685.
- [28] Størvald R, Malnes E. Snow covered area retrieval using Envisat ASAR wide-swath in mountainous areas. IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. September 20-24, 2004, Anchorage, AK, USA. IEEE, 2004: 1845-1848.
- [29] Rondeau-Genesse G, Trudel M, Leconte R. Monitoring snow wetness in an Alpine Basin using combined C-band SAR and MODIS data. Remote Sensing of Environment, 2016, 183: 304-317.
- [30] 孙少波, 车涛, 王树果, 王增艳. C 波段 SAR 山区积雪面积提取研究. 遥感技术与应用, 2013, 28(3): 444-452.
- [31] Nagler T, Rott H, Ripper E, Bippus G, Hetzenecker M. Advancements for snowmelt monitoring by means of Sentinel-1 SAR. Remote Sensing, 2016, 8(4): 348.
- [32] 孙维君, 秦翔, 任贾文, 吴锦奎, 杜文涛, 刘宇硕, 侯典炯. 祁连山老虎沟 12 号冰川积累区消融期能量平衡特征. 冰川冻土, 2011, 33(1): 38-46.
- [33] 李健, 秦翔, 孙维君, 张明杰, 杨俊华. 祁连山老虎沟 12 号冰川近地层微气象特征分析. 高原气象, 2012, 31(2): 370-379.
- [34] Liu Y S, Qin X, Du W T, Sun W J, DianJiong Hou Qilian Shan Station of Glaciology, Environment E, State Key Laboratory of Cryospheric Science, Cold, Environmental A R, Institute E R, Sciences C A O, Lanzhou, Gansu, China. The movement features analysis of Laohugou Glacier No.12 in Qilian Mountains. Sciences in Cold and Arid Regions, 2011, 3(2): 119-123.
- [35] 马爱爱, 徐世健, 敏玉霞, 王鹏, 汪亚娟, 张新芳. 祁连山高山植物根际土放线菌生物多样性. 生态学报, 2014, 34(11): 2916-2928.
- [36] 杜文涛, 秦翔, 刘宇硕, 王旭峰. 1958—2005 年祁连山老虎沟 12 号冰川变化特征研究. 冰川冻土, 2008, 30(3): 373-379.
- [37] Kundu S, Chakraborty M. Delineation of glacial zones of Gangotri and other glaciers of Central Himalaya using RISAT-1 C-band dual-pol SAR. International Journal of Remote Sensing, 2015, 36(6): 1529-1550.
- [38] Baars E P, Essen H. Millimeter-wave backscatter measurements on snow-covered terrain. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(3): 282-299.
- [39] Miranda N, Meadows P, Hajduch G, Pilgrim A, Piantanida R, Giudici D, Small D, Schubert A, Husson R, Vincent P, Mouche A, Johnsen H, Palumbo G. The Sentinel-1A instrument and operational product performance status. 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). July 26-31, 2015, Milan, Italy. IEEE, 2015: 2824-2827.
- [40] Caves R, Miller D, Nagler T, Voigt S, Broadgate M, Wright G. HYDALP Hydrology of Alpine and High latitude Basins. Technical Report, Shared Cost Action Projects in Area3.3 (CEO) of the Specific Programme for Climate and Environment. 1998.