

# 基于遥感反演雪表粒径变化的山区高分辨率融雪探测

孙海娇, 熊川, 韩晨阳

西南交通大学 地球科学与工程学院, 成都 611756

**摘要:** 季节性积雪的演变对于山区水文循环具有决定性影响, 同时也是调控陆地生态系统的关键要素。精确监测融雪动态对于气象、水文以及全球气候变化的研究至关重要, 同时也对灾害预测、预警发挥着不可或缺的作用。然而, 传统的基于时间序列合成孔径雷达 (SAR) 的融雪监测技术常受到植被、地形及积雪特性等因素的影响, 并且在重访周期较长的区域监测效果有限。本研究利用高时空分辨率的 Sentinel-2 卫星光学遥感数据, 基于雪表粒径的时间序列变化信息, 提出了一种新颖的融雪监测方法。以阿勒泰地区为例, 参照站点雪水当量和气温数据, 深入分析了新方法的融雪监测性能。本文对比了新融雪监测方法与常规的时间序列 SAR 方法, 探讨了两者在山区融雪监测方面的优势与局限。结果表明该新方法能够较为准确地识别融雪起始时间, 并且在植被和混合像元等干扰因素的影响下, 展现出了比时间序列 SAR 方法更出色的监测能力。但是, 新方法易受云雨气象条件的影响, 未来可与时间序列 SAR 方法互为补充, 共同提升山区融雪监测的时效性和准确性。

**关键词:** 积雪粒径, 后向散射, 融雪, 合成孔径雷达, 光学遥感

**中图分类号:** P2

**引用格式:** 孙海娇, 熊川, 韩晨阳. 2024. 基于遥感反演雪表粒径变化的山区高分辨率融雪探测. 遥感学报, 28(9): 2252-2264

Sun H J, Xiong C and Han C Y. 2024. High-resolution snowmelt detection in mountainous areas based on remote sensing retrieved snow surface grain size variation. National Remote Sensing Bulletin, 28(9): 2252-2264 [DOI: 10.11834/jrs.20243465]

## 1 引言

季节性积雪是自然界最重要的水资源之一, 约有 12 亿人依靠融雪进行生活生产 (Barnett 等, 2005)。然而, 融雪可能会引起雪崩、季节性洪水等诸多自然灾害, 危害生态系统平衡。因此, 通过技术手段精确获取山区积雪状态和融雪信息对于水资源管理、水循环研究以及灾害的预测预警等尤为重要。

通过多时相的观测技术记录雪参数的变化, 即可获取有关积雪融化的信息。例如, 可通过站点连续测量雪水当量 SWE (Snow Water Equivalent) 来观察积雪内液态水质量是否降低, 从而判断积雪的融化 (Kinar 和 Pomeroy, 2015), 但此类测量的安装和维护成本非常高, 在山区难以实现。卫星遥感以其宏观、多时相、高效等诸多优势, 已

逐渐成为积雪监测的主要技术手段 (李新 等, 2020; 梁顺林 等, 2021; 李三妹 等, 2007; 王静 等, 2023; 王晓艳 等, 2017)。利用被动微波探测融雪是通过探测时间序列亮度温度的突变来实现, 熊川等 (2019) 将 Nimbus-7 卫星搭载的扫描多通道微波辐射计 SMMR (Scanning Multi-channel Microwave Radiometer) 及国防气象卫星计划 DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) 卫星搭载的 SSM/I-SSMIS 辐射计, 从 1979 年—2018 年的观测数据用于融雪提取, 并与 ERA5 再分析数据中的气温数据进行对比分析, 得出了高亚洲地区冰雪融化时间变化的相关规律, 但其结果受到了被动微波数据低空间分辨率的限制。合成孔径雷达 (SAR) 空间分辨率较高, 可用于山区高分辨率融雪监测。积雪的后向散射系数会随着积雪中液态水的出现而迅速降低, 因此利用干雪与湿雪的后向散射信

收稿日期: 2023-11-15; 预印本: 2024-04-16

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 41871266)

第一作者简介: 孙海娇, 研究方向为冰冻圈遥感。E-mail: sunhaijiao4684@163.com

通信作者简介: 熊川, 研究方向为冰冻圈遥感。E-mail: xiongchuan@swjtu.edu.cn

号差异可有效探测湿雪。早在 20 世纪 80 年代，Mätzler 和 Schanda (1984) 就揭示了 X 波段和 C 波段 SAR 探测湿雪的能力。随着 Sentinel-1 卫星的发射，大量研究使用可公开获取的时间序列 C 波段 Sentinel-1 后向散射信号来进行湿雪探测 (Baghdadi, 1997; Koskinen 等, 1997; Nagler 和 Rott, 2000; Rondeau-Genesse 等, 2016; Gagliano 等, 2023)。Nagler 和 Rott (2000) 使用 ERS SAR 数据，将 -3 dB 的阈值应用到阿尔卑斯山湿雪探测中，探测精度达到 85.4%，并在后续对阈值探测算法不断改进和完善 (Nagler 和 Rott, 2005; Nagler 等, 2016)。Nagler 和 Rott (2005) 在研究中发现虽然交叉极化 (VH 或 HV) 的 C 波段信号对积雪中液态水表现出更高的敏感性，但其受到噪声的影响更加严重。仅少量研究尝试探索和评估交叉极化信号在湿雪制图方面的可行性 (Buchelt 等, 2022; Marin 等, 2020; Rondeau-Genesse 等, 2016; Antropova 等, 2022)。另一方面，研究发现 SAR 信号虽然是湿雪探测的有效工具，但其本身不仅受到植被覆盖 (Pivot, 2012) 和地形 (Nagler 和 Rott, 2000) 的影响，还会因积雪性质 (如积雪深度和表面粗糙度等) 发生变化 (Liu 等, 2006)。研究人员不断尝试通过改进算法降低这些不确定性因素的影响，Rondeau-Genesse 等 (2016) 将 C 波段 SAR 数据与 MODIS 数据交叉参考，使用阈值函数而非固定阈值来检测湿雪，一定程度上削弱了植被覆盖对后向散射信号的影响；Karbou 等 (2021) 利用相似性度量来改进湿雪探测算法，为参考数据的选择提供了有价值的指导；Buchelt 等 (2022) 提出一种利用后向散射阈值和导数进行湿雪探测的方法，使 Nagler (2016) 方法能够适应 SAR 信号的季节性演变，该算法不仅可以获取开始融雪的时间，还能够获取雪盖变化，提升了低植被地区湿雪探测的精度。以上研究表明，SAR 可以有效地进行融雪探测，特别是在密集时间序列 C 波段 SAR (Sentinel-1) 发射之后，但是此方法会在一定程度上受到植被覆盖、地形和积雪性质等因素的干扰。此外，Sentinel-1 卫星在某些地区重访时间间隔较长，将会对融雪探测效果造成影响。

光学遥感数据通常被用于反演积雪范围和积雪覆盖度 (Dozier 等, 2008; Hall 等, 2002; Nolin, 2010; Parajka 和 Blöschl, 2006)。对于积雪覆盖的光学检测算法不断发展完善 (Brubaker 等,

2005; Crawford, 2015; Salomonson 和 Appel, 2004)。Vandecrux 等 (2022) 使用 Sentinel-3 光学影像结合渐进辐射传输模型反演雪表粒径，通过捕获积雪融化时雪颗粒的光学等效粒径的突变来探测湿雪，其结果与传统被动微波融雪探测方法的探测结果保持了良好的一致性。该方法虽受云雨的影响，但相对于被动微波遥感显著提高了空间分辨率，适用于局部到区域尺度上的融雪探测。对于山区高分辨率融雪探测，Sentinel-3 影像在空间分辨率上仍存在不足，且在山区易形成混合像元，不利于进行融雪探测。Sentinel-2 卫星提供了高时空分辨率的光学影像，具有实现高分辨率山区融雪探测的潜力。本文提出一种使用 Sentinel-2 时间序列观测进行山区高分辨率融雪探测的方法，该方法首先利用积雪反射模型反演积雪粒径，随后利用粒径的时间序列变化信息进行融雪探测。

现阶段通过光学遥感影像反演雪表粒径主要基于 Kokhanovsk 和 Zege (2004) 提出的渐进式辐射传输模型 ART (Asymptotic Radiative transfer Theory)。郝晓华等 (2013) 将 ART 模型应用于中国北疆地区的雪粒径反演研究中，对适用 ART 模型模拟不同粒径、不同形状的积雪光谱特征进行了准确性评估。其结果表明，ART 模型反演结果会因为雪粒径实际形状不规则等问题产生一定的误差。Xiong 等 (2015) 提出一种基于几何光学理论和矢量辐射传输理论的混合雪反射模型 (以下称 BicGORT 模型)，该模型构造了一个基于计算机模拟随机介质的积雪微结构模型，利用几何光学理论和辐射传输理论模拟反射率，可用于积雪粒径的反演 (Xiong 和 Shi, 2018)，从而进一步开展融雪探测。

综上，本文旨在 (1) 提出一种基于 Sentinel-2 数据的山区高分辨率融雪探测方法，分别使用 ART 模型与 BicGORT 模型进行雪表粒径反演，并采用基于时序雪表粒径的变化信息获取 2020 年融雪季研究区域的积雪开始融化日期的时空分布。(2) 利用 Sentinel-1 IW GRD 数据，利用基于时序后向散射系数变化信息获取积雪开始融化日期分布。(3) 对比光学方法与 SAR 方法在山区高分辨率融雪探测中的优势与局限性。

## 2 研究区域与数据

### 2.1 研究区概况

阿勒泰地区位于新疆维吾尔自治区北端，地

处阿尔泰山中段西南麓（苏勇文，2004）。本文研究区域选取阿勒泰地区 87.60°E—88.73°E，47.49°N—48.75°N 范围，该区域内高程变化大（图 1），能够体现雪粒径大小以及积雪开始融化日期的垂直差异，且降雪频繁，雪期长。

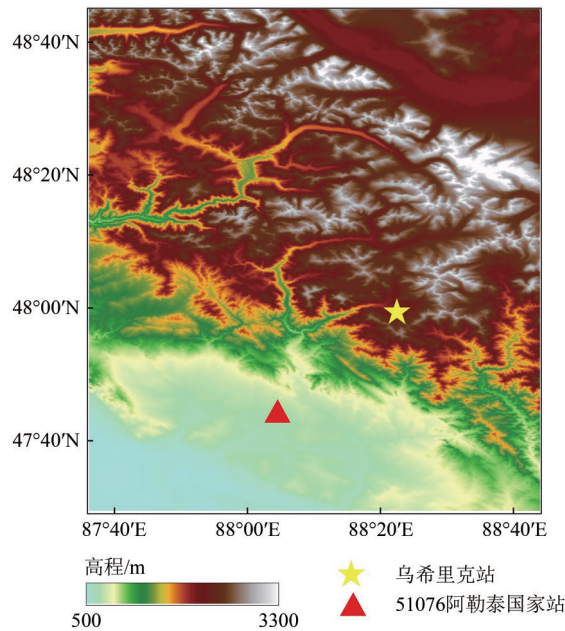


图 1 研究区域地形图  
Fig. 1 The topographic map of the study area

2.2 Sentinel-2 影像与预处理

Sentinel-2 是由欧洲航天局发射的高分辨率多光谱成像卫星，由 A、B 两颗卫星组成，二者结合重访周期可达 5 天。本文所使用的 Sentinel-2 L2A 级数据（经过大气校正的地表反射率数据）相关信息如表 1 所示。

表 1 研究所使用的 Sentinel-2 L2A 级数据  
Table 1 The Sentinel-2 L2A data used in this paper

日期(2020 年)	幅号	时间(UTC)	数量
2 月 8 日—6 月 27 日	UWP、UXP、TWN、TXN	5:10 左右	各 29 景

2.3 Sentinel-1 影像与预处理

Sentinel-1 由搭载 C 波段 SAR 的 A、B 两颗卫星组成，单颗卫星重访周期为 12 d。为尽可能缩短两次影像成像的时间间隔，本文使用了覆盖该区域的 6 组 Sentinel-1 IW GRD 数据，相关信息如表 2 所示。

本文利用 SNAP 软件（<http://step.esa.int/main/> [2023-11-15]）对 Sentinel-1 数据进行预处理，主要处理包括：（1）精密轨道校正；（2）去除热噪

声；（3）辐射定标输出后向散射系数  $\sigma^0$ ；（4）使用 ASTER GDEM 数据进行地形校正，并输出入射角和叠掩、阴影覆盖区域等数据；（5）将各组影像逐像素配准；（6）使用 Gamma Map 滤波器，采用 7×7 窗口对数据进行滤波，降低数据的相干斑噪声；（7）裁剪研究区域。

表 2 研究所使用的 Sentinel-1 IW GRD 级数据  
Table 2 The Sentinel-1 IW GRD data used in this paper

序号	相对轨道号	飞行方向	日期 (2020 年)	时间 (UTC)	数量
1	143	升轨	1 月 5 日—6 月 21 日	11:55	15 景
2					15 景
3	19	降轨	1 月 3 日—6 月 19 日	00:13	15 景
4					15 景
5	41	升轨	1 月 10 日—6 月 26 日	12:03	15 景
6					15 景

2.4 辅助数据

研究使用的其他辅助数据：

（1）第 3 版 ASTER GDEM（ASTER Global Digital Elevation Model V003）数据（<https://urs.earthdata.nasa.gov/> [2023-11-15]）；

（2）30 m 空间分辨率的全球地表覆盖数据（GlobeLand30）（Chen 等，2015；Jun 等，2014）（<http://www.globallandcover.com/> [2023-11-15]）；

（5）站点实测数据：乌希里克野雪公园站（47.99°N，88.37°E）的 SWE 数据、气温数据；阿勒泰气象站（47.74°N，88.07°E）的降水数据及气温数据。

3 基于雪表粒径时序变化的融雪探测方法

3.1 雪表粒径反演

3.1.1 反演模型

研究分别使用 ART 模型和 BicGORT 模型反演雪表粒径。ART 模型采用渐进分析法得到辐射传输模型的渐进解析解（Kokhanovsky 和 Zege，2004）。利用 ART 模型模拟雪表反射率过程如图 2（a）所示，由于无法获取具体积雪形状参数，研究使用 Zege 提出的积雪反射模型，设置形状参数  $A=5.8$ ，具体表达式如下（Zege 等，2011）：

$$d = \frac{1}{\gamma A^2 f^2} \ln \left( \frac{R}{R_0} \right) (A = 5.8) \quad (1)$$

式中,  $\gamma = 4\pi\chi(\lambda)/\lambda$  为冰的吸收系数,  $\chi(\lambda)$  为冰的复折射率虚部, 与入射光的波长相关;  $R(\mu, \mu_0, \varphi)$  为半无限空间的雪反射率;  $\mu, \mu_0, \varphi$  分别为太阳天顶角、观测天顶角以及相对方位角;  $R_0$  为假定单次散射反照率等于1情况下的半无限空间雪层反射率。

BicGORT模型利用计算机模拟随机介质来模拟雪的微观结构, 将几何光学理论结合 Monte Carlo 算法来模拟雪的散射特性, 通过解算辐射

传输方程来模拟雪的反射率, 包括偏振反射率 (Xiong 等, 2015)。与其他基于 Monte Carlo 光线追踪技术设计的模型相比, BicGORT模型即使对于短波长也有较高的计算效率, 可用于大规模模拟和实际使用。研究已经证明, BicGORT模型的模拟结果与其他基于 Mie 理论的传统模型相比, 在模拟雪的双向反射率方面效果明显提高。利用 BicGORT模型模拟雪表反射率过程如图2(b)所示, 主要输入参数为波长、积雪光学等效粒径、粒径分布参数、积雪密度、太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角等。

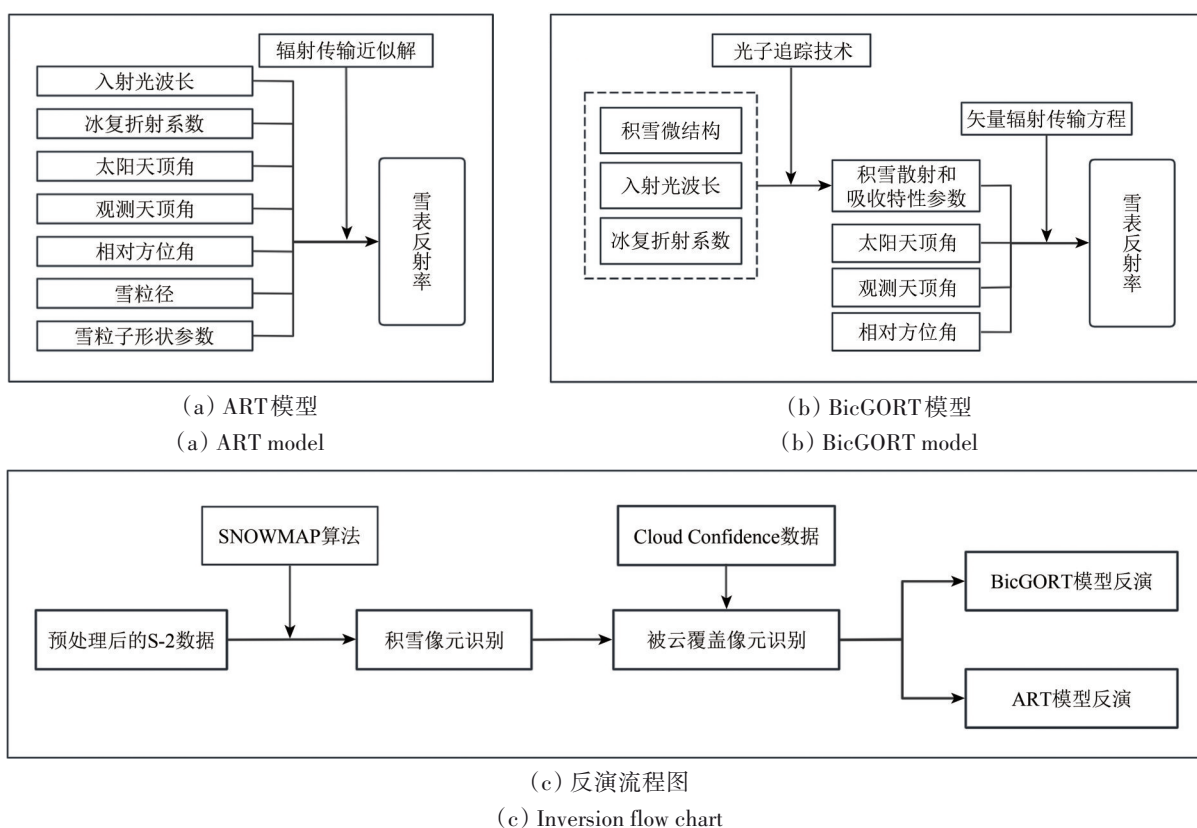


图2 模型模拟及反演流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model simulation and inversion process

### 3.1.2 积雪表层粒径反演流程

雪表粒径的反演主要包括3个步骤: (1) 纯雪像元识别; (2) 云覆盖像元识别; (3) 利用积雪反射模型反演积雪粒径。为了避免混合像元对积雪粒径反演的影响, 本文只在纯雪像元开展积雪粒径反演和融雪探测。通常, 归一化积雪指数 (NDSI) 被用于提取纯雪像元 (Hall 等, 2002)。Sentinel-2数据的归一化积雪指数 NDSI 可用绿波段反射率 ( $\rho(B_3)$ ) 和短波红外波段反射率 ( $\rho(B_{11})$ )

计算, 即:

$$\text{NDSI} = \frac{\rho(B_3) - \rho(B_{11})}{\rho(B_3) + \rho(B_{11})} \quad (2)$$

纯雪像元可综合利用 NDSI 和第8波段反射率 ( $\rho(B_8)$ ) 进行判断, 如式 (3) 所示 (张彦丽和张丽萍, 2020)。

$$\begin{cases} \text{NDSI} > 0.42 \\ \rho(B_8) > 0.11 \end{cases} \quad (3)$$

云覆盖区域不能进行有效的积雪粒径反演,

因此需要对云覆盖像元进行识别和去除。本文使用 Sentinel-2 L2A 数据产品中所提供的影像分类结果去除了云和云阴影像元。考虑到波段反射率对积雪粒径的敏感性和各波段的空间分辨率, 本文选用波长为 865 nm 的 B8a 波段来反演雪表粒径。由于在 865 nm 波长光对积雪介质的穿透深度在厘米级 (Warren, 2019; Libois 等, 2013), 因此反演的粒径为积雪表层数厘米深度内的等效粒径。在进行雪表粒反演时, 对于 ART 模型, 采用式 (1) 即可计算雪表粒径; 对 BicGORT 模型, 本文首先利用模型模拟查找表, 随后根据观测地表反射率和太阳天顶角、观测天顶角、相对方位角等在查找表中查找最优粒径实现雪表粒径的反演。

### 3.1.3 积雪粒径反演结果

研究区域 4 月 8 日雪表粒径空间分布如图 3 所示, 雪表粒径呈现出海拔上的垂直分异, 反映了不同条件下的表层粒径的差异。提取阿勒泰气象

站处两模型反演的雪表粒径时间序列, 结合站点实测的降水、气温数据 (图 4), 可以明显观察到降雪、气温与雪表粒径的相关关系。当发生降雪, 小颗粒的新雪覆盖旧雪, 雪粒径随之降低; 而当气温升高积雪开始融化, 雪粒径则不断增大。使用 ART 模型反演得到的雪表粒径数值上普遍大于使用 BicGORT 模型计算的结果, 这可能是由于两种模型对雪粒径形状的假设不同所导致的, 也可能是由于两种模型对散射和吸收的建模方式不同导致。此外, 云的存在导致了部分雪表粒径数据的缺失, 这将对后续探测积雪开始融化日期造成一定影响。值得注意的是, 利用光学反射率反演的积雪粒径实际上为“光学等效粒径” (Wiscombe 和 Warren, 1980; Dozier 等, 1987; Grenfell 和 Warren, 1999; Carlsen 等, 2017), 而另一种常见的积雪粒径的定义为积雪颗粒的各方向最大尺寸 (Fierz 等, 2009; Leppänen 等, 2015), 两者的定义和大小均不同。

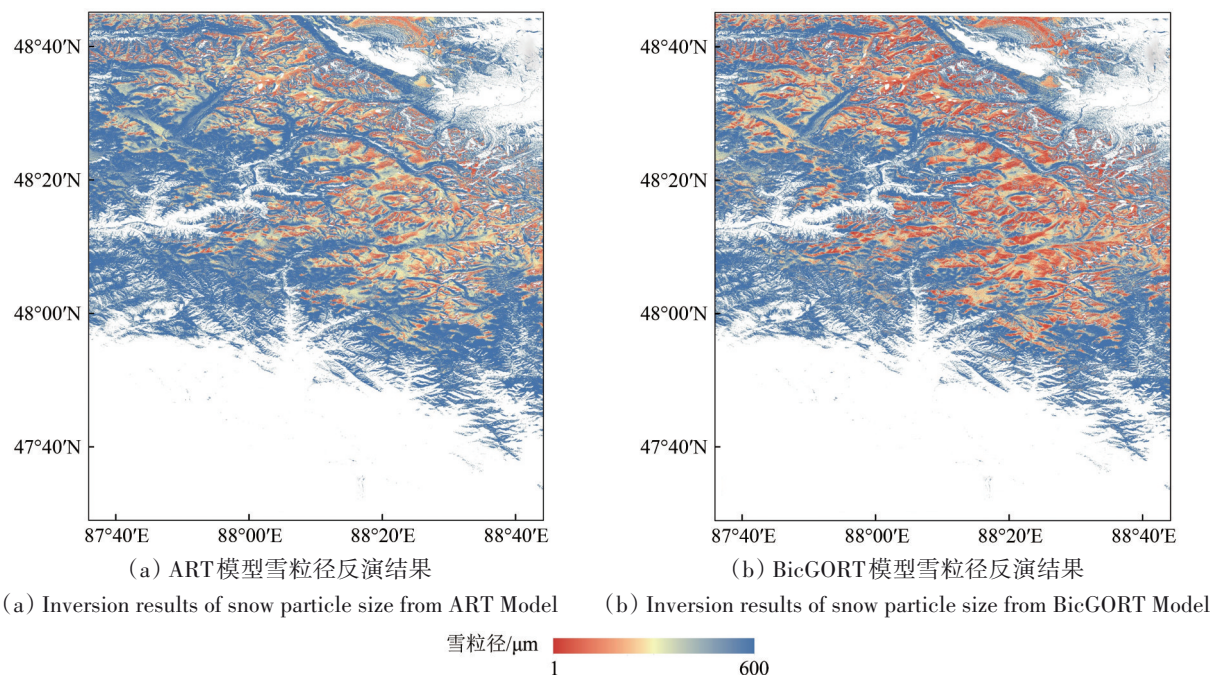


图3 研究区域4月8日雪表粒径反演结果

Fig. 3 Retrieval results of snow surface optical grain size in the study area on April 8th

### 3.2 融雪探测方法

雪的变质作用是指雪粒在大小、形状上发生变化的过程 (Armstrong 和 Brun, 2008)。在融雪开始时, 液态水逐渐充满雪颗粒之间的孔隙, 相邻雪颗粒粘连、聚集成较大颗粒 (图 5) (Colbeck, 1983; Chen, 2018)。由于液态水与冰介质相近的

光学性质, 当液态水连接积雪颗粒时, 遥感反演的粒径实际为通过液态水连接的所有积雪颗粒形成的聚集颗粒的等效粒径; 当这样的湿雪重新冻结时, 颗粒之间的液态水变为冰。以上两种情况下, 遥感反演的积雪粒径都会显著大于未发生融化时期的积雪粒径。因此, 可通过获取雪粒径的

突变来实现对融雪的探测。另外，部分地区积雪可能在一个卫星重访周期内完全消融，原本积雪覆盖地区积雪像元将消失。基于以上考虑，本文所获取的“积雪开始融化日期”为：（1）在积雪覆盖期间雪粒径增大且持续超过一定阈值时，取此时的观测时间作为“积雪开始融化日期”；（2）积雪覆盖期间未观察到粒径突变，随后该处呈无雪覆盖状态，此时取最后一次观测到像元被积雪覆盖的时间作为“积雪开始融化日期”。

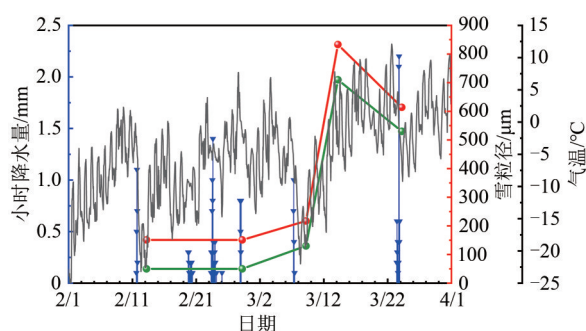


图4 阿勒泰气象站小时降水量、气温与两模型雪粒径反演结果

Fig. 4 Hourly precipitation and air temperature at the Altay meteorological stations and the retrieved snow optical grain size from the two models

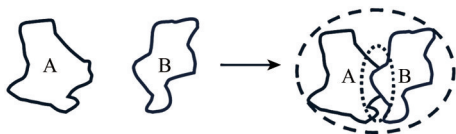


图5 雪颗粒被水连接形成较大粒子

Fig. 5 Snow particles are connected by water to form larger particles

从光学数据反演的时间序列积雪表层粒径可发现，干雪和湿雪之间的粒径差异十分巨大，这个差异远大于干雪期由于新雪粒径差异和表层粒径增长造成的粒径差异，因此选取一个稍大的粒径阈值可以对干湿雪进行区分，且受到干雪期粒径变化的影响较小。根据本文研究区的反演时间序列雪表粒径（图4），对ART模型反演粒径取250 μm作为阈值，对BicGORT反演粒径取170 μm作为阈值。

## 4 基于SAR后向散射时序变化的融雪探测方法

### 4.1 基于SAR的融雪探测基本原理

纯冰的微波波段介电常数约为3.15，液态水

的微波波段介电常数约为80（Woodhouse, 2006; Hallikainen, 1977）。干雪是由冰和空气组成的，而湿雪是冰、空气和液态水的混合物。在湿雪中液态水的存在将会造成较高的介电损耗，微波的穿透深度随之显著降低。一般情况下，积雪覆盖地区的后向散射主要包括：发生在积雪—土壤界面、雪层之间的界面和空气—积雪界面的表面散射，以及发生在积雪层中的体散射。积雪总的后向散射计算如式（4）：

$$\sigma_t = \sigma'_g + \sigma_{gv} + \sigma_v + \sigma_{as} \quad (4)$$

式中， $\sigma'_g$ 为土壤—积雪界面的散射， $\sigma_{gv}$ 为土壤—积雪界面与体散射的相互作用项， $\sigma_v$ 为积雪体散射， $\sigma_{as}$ 为空气—积雪界面的面散射。

随着积雪中液态水的出现，VV和VH极化后向散射系数均呈现显著下降，具体表现在：积雪中液态水含量的增加，来自雪面后向散射信号小幅增加，体散射强度大幅降低，积雪—土壤界面后向散射信号也因积雪对电磁波的吸收作用迅速降低。这为湿雪的探测提供了理论基础。

### 4.2 基于SAR观测的融雪探测方法

本研究使用Nagler提出一种比值计算的方法，将当前观测线性后向散射系数与参考影像的线性后向散射系数取比值（式（5）），当比值小于-2 dB则认定当前为湿雪（式（6））（Nagler等，2016）。某处“积雪开始融化日期”即为后向散射信号突变达阈值时的观测日期。

$$\text{Ratio(dB)} = 10 \times \log_{10} \left( \frac{\sigma^0}{\sigma_{\text{reference}}^0} \right) \quad (5)$$

$$\text{Ratio(dB)} < -2 \text{ dB} \quad (6)$$

该算法整体处理流程包括：（1）使用冬季干雪状态的4景影像用于计算参考后向散射数据（ $\sigma_{\text{reference}}^0$ ）；（2）利用阈值探测算法探测湿雪，提取积雪开始融化日期；将入射角小于15°和大于75°部分的像素去除并结合地形校正时输出的叠掩和阴影覆盖区域，进一步对影像进行掩膜运算；（3）每组影像VV极化与VH极化数据均进行上述处理，将使用VH极化数据探测到的积雪开始融化日期作为采用VV极化数据探测结果的补充，并结合DEM数据去除异常值；（4）提取每个像素6组数据中融雪的最早时间作为最终该像素的积雪开始融化日期；（5）利用地表覆盖数据去除水体和湿地覆盖区域。

在融雪初期昼夜温度的日变化可能会导致积雪出现日内融化—冻结—再融化的情况，因此影

像成像时间不同可能造成探测的积雪开始融化日期的差异。在此,本文所探测的积雪开始融化日期为所能够探测到的积雪最早开始融化的时间,而不考虑后续的冻融过程。

## 5 结果分析与验证

### 5.1 积雪开始融化日期的时空分布特征

利用上述方法提取的积雪开始融化日期分布如图6所示。图6(a)、图6(b)分别为使用ART

模型和BicGORT模型反演雪粒径的融雪探测结果,图6(c)为SAR方法的融雪探测结果。整体来看,积雪开始融化日期随着海拔的升高呈现推迟趋势,由于地形阴坡、阳坡受太阳辐射量大小的差异,阴坡积雪开始融化日期晚于阳坡。光学方法采用积雪反射率模型提取的积雪开始融化日期具有小幅差异(图6(a)与图6(b)),这可能与不同积雪反射率模型所采用的积雪粒子形状、不同积雪反射率模型对光的吸收散射模拟方法不同,以及干湿雪粒径阈值的选取等因素有关。

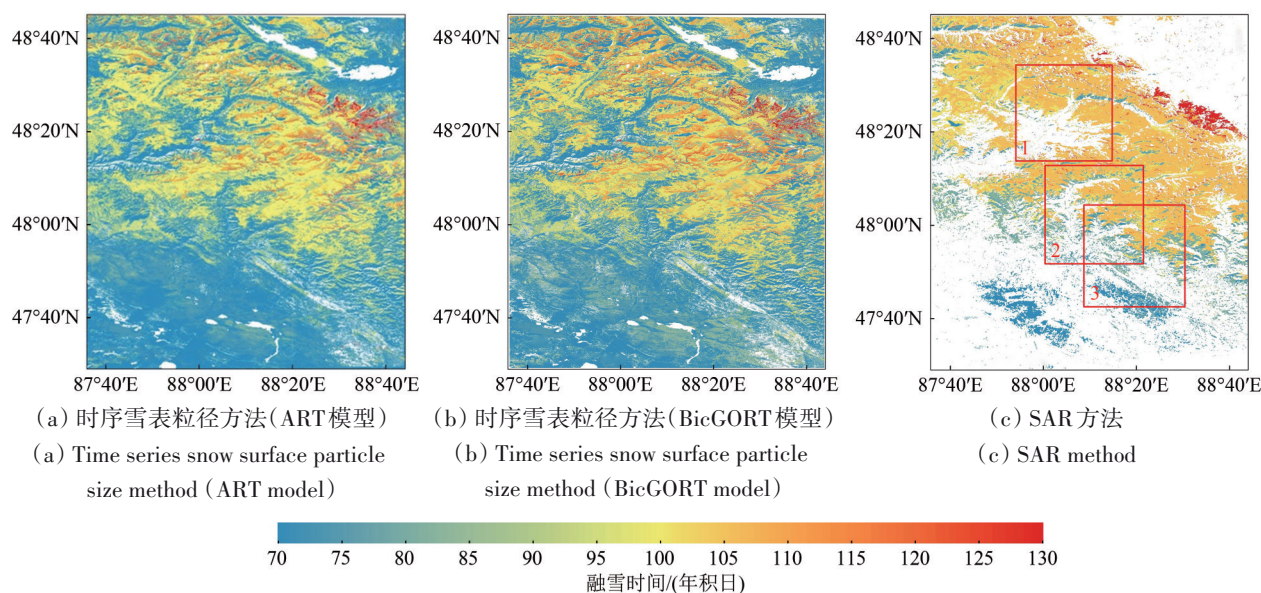


图6 积雪开始融化日期空间分布图  
Fig. 6 Snowmelt onset date distribution map

光学方法(BicGORT模型)与SAR方法的积雪开始融化日期结果呈现出一定的正相关关系(图7),融雪开始时间集中在3月底至4月中旬,总体上光学方法探测到的积雪开始融化日期略早于SAR方法。从图6(b)与图6(c)的对比可发现,光学方法探测到的融雪开始时间结果较SAR方法呈现出更丰富的空间细节。当对Sentinel-1数据进行了相干斑滤波操作之后,其有效空间分辨率低于Sentinel-2数据,这是两者空间细节上呈现差异的部分原因。此外,从图6(b)与图6(c)的对比可发现,SAR方法在低海拔地区和森林覆盖地区探测到较少的有效积雪开始融化日期信息,而光学方法探测到的积雪开始融化日期在空间上更完整,这可能与以下因素有关:(1) SAR方法无法在阴影和叠掩区域进行融雪探测。(2) 在高植被覆盖地区,C波段电磁波对植被本身更敏感而

对植被下的积雪敏感性较低,因此无法有效探测到融雪,而Sentinel-2数据空间分辨率较高,在森林覆盖的空隙区仍然可以进行有效的融雪探测。(3) 在低海拔浅雪区,SAR观测到的后向散射会受到混合像元的影响,当像元内部分区域被湿雪覆盖而另一部分由于积雪完全融化被裸土等覆盖时,由于融雪后湿润土壤的后向散射迅速增加抵消了由于积雪变湿造成的后向散射降低,因此在这种情况下无法观测到后向散射明显降低,造成SAR方法无法有效探测到融雪。(4) 在低海拔地区往往升温快、积雪深度浅,积雪在相邻两次SAR观测之间就完全消融,从而无法捕捉到后向散射的降低,也会造成SAR方法无法有效探测到融雪。(5) 当积雪存在融化—冻结—再融化的情况时,若SAR观测到融化后再冻结的积雪,由于SAR后向散射对积雪含水量敏感,此时无法探测

到融雪，而对光学方法，雪表粒径由于融化后再冻结仍然会维持较大粒径，因此在这种情况下光学方法仍然可以有效探测到融雪。

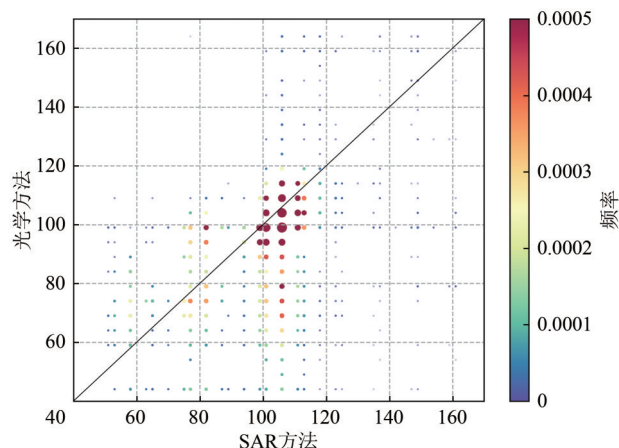


图7 SAR方法与光学方法(BicGORT模型)积雪开始融化日期

Fig. 7 Scatter plots of snowmelt onset data obtained by SAR and optical method (BicGORT model)

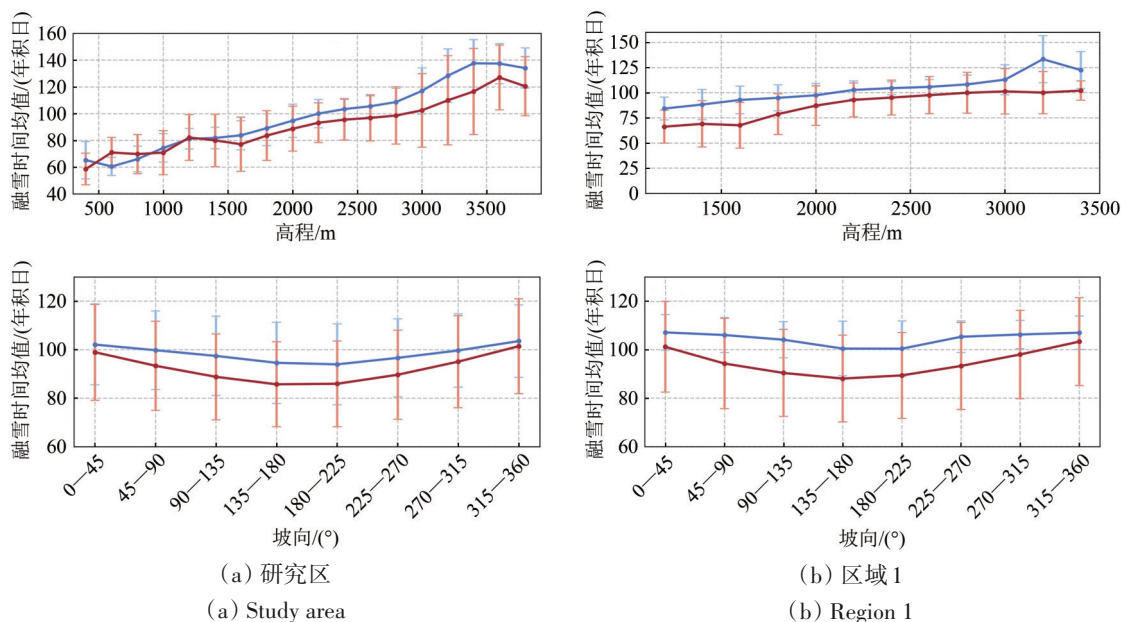
## 5.2 积雪开始融化日期的海拔、坡向依赖性

为了进一步分析两种方法结果的差异，本文统计了融雪开始时间与海拔、坡向之间的关系，如图8所示。光学与SAR方法提取的融雪开始时间均呈现与海拔的正相关关系，光学方法探测到的融雪开始时间总体略早于SAR方法。从积雪开始

融化日期与坡向之间的关系发现，虽然光学方法和SAR方法探测到的融雪开始时间均呈现与坡向相似趋势，即阳坡相比阴坡更早，但是光学方法探测到的融雪开始时间随坡向的变化更剧烈，即不同坡向呈现的融雪开始时间差异更大，特别是区域1。这可能是由于两种方法对积雪融化探测的物理机制或是对积雪融化敏感性不同导致的。

## 4.3 站点验证

为了验证融雪探测方法和结果，本文利用海拔2100 m左右的乌希里克站观测的SWE数据和气温数据，与使用光学方法(BicGORT模型)在站点处反演的时序雪表粒径数据以及SAR方法在该站点处所的时序后向散射数据进行了对比(图9)。从图9可见，该站点4月8日左右日最高气温达到10℃左右，积雪开始融化，SWE出现明显降低，至28日该站点处积雪完全消融。本文的探测结果与SWE、气温的变化与相符，验证了本研究所使用的方法探测融雪结果的可靠性。延时相机拍摄照片(图10)显示，站点处在4月6日—8日上午8时为干雪状态，8日下午14点积雪表面已经出现明显的湿雪状态。SAR方法在4月8日的观测是在上午8点，因此未观测到融化。4月10日中午发生了一场降雪，表层雪融化不明显，但积雪下层仍为湿雪，因此SAR方法在4月10日观测到融雪。



(a) 研究区  
(a) Study area

(b) 区域1  
(b) Region 1

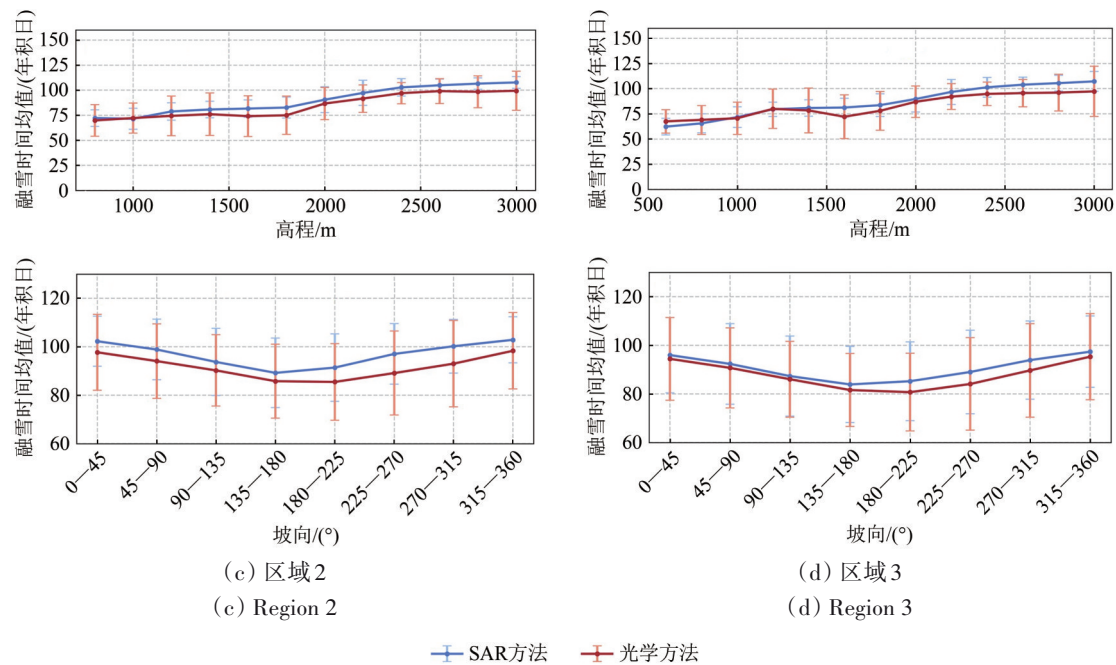


图8 积雪开始融化日期随海拔、坡向的变化(坡向以朝北为0度,顺时针增加,图中竖线表示标准差( $\pm$ 标准差),横线表示均值。区域1、2、3为图6(c)所示的小区域1、2、3)

Fig. 8 Variation of snowmelt onset date with elevation and aspect direction ( $0^\circ$  aspect indicates north facing slopes, and increases clockwise. The vertical line indicates the standard deviation ( $\pm$ standard deviation) and the horizontal line indicates the mean value. Regions 1, 2, and 3 are the small regions 1, 2, and 3 shown in Fig. 6(c))

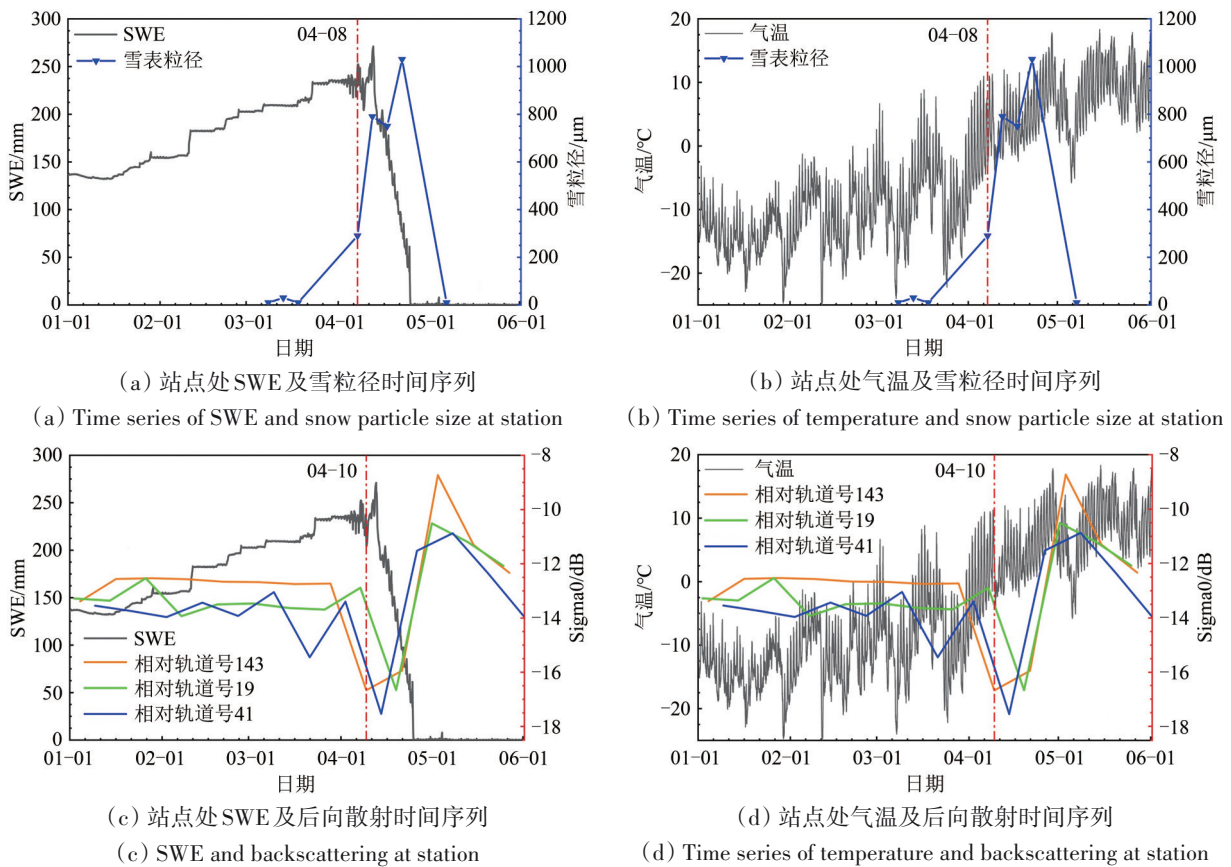


图9 结果验证  
Fig. 9 Validation of results



图 10 乌希里克站实拍照片  
Fig. 10 Photos at Wuxilike station

## 6 结 论

本文以新疆维吾尔自治区阿尔泰山为研究区域,提出一种基于高分辨率光学影像观测和雪表粒径时间序列变化的融雪探测方法。主要结论如下:(1)在本文研究区内,该方法能够灵敏地探测到融雪的发生,并且由于Sentinel-2数据自身的高时空分辨率,该方法能够获取明显丰富的融雪信息。光学方法与微波方法相结合,能更好地实现及时、准确的山区高分辨率融雪探测;(2)由于不同积雪反射率模型在积雪粒子形状和对光散射吸收的建模方式不同,基于不同积雪反射率模型反演的积雪粒径存在差异,此外对于干湿雪粒径阈值的选取也会对结果造成影响。因此,所采用的积雪反射率模型不同会导致融雪探测在结果上呈现出一定差异;(3)光学方法提取的积雪开始融化日期与SAR方法总体接近,呈现相似的海拔和坡向依赖性特征,但是也存在一定程度的差别,这可能与两者的探测原理不同以及数据源不同等因素有关。(4)与SAR方法相比,光学方法受到相干斑噪声、混合像元和植被覆盖的影响更小。尤其在低海拔和植被覆盖地区,该方法探测融雪的能力明显优于SAR方法;(5)光学方法无法在云覆盖的条件下进行,云的存在将干扰监测雪粒径的连续变化,影响积雪开始融化日期探测的准确性。同时,云、雪像元的错误分类也将影响融雪的判别;此时,SAR方法仍然显示出巨大优势;

(6) Sentinel-2卫星5天的时间分辨率仍存在不足,当气温迅速升高且雪深较浅的情况下,在一个重访周期内积雪将完全融化,因此无法捕捉到雪粒径变化。

本文所提出的方法对融雪的探测可以达到较高的精度,但在上述方面仍存在不足之处。后续可以考虑利用更优的云检测算法实现对云雪的更有效区分,以及在时间序列中加入Landsat等其他高分辨率影像等方法进行改进。

## 参考文献(References)

- Antropova Y K, Komarov A S, Richardson M, Millard K and Smith K. 2022. Detection of wet snow in the Arctic tundra from time-series fully-polarimetric RADARSAT-2 images. *Remote Sensing of Environment*, 283: 113305 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113305]
- Armstrong R L and Brun E. 2008. *Snow and Climate: Physical Processes, Surface Energy Exchange and Modeling*. Cambridge: Cambridge University Press
- Baghdadi N. 1997. Capability of multitemporal ERS-1 SAR data for wet-snow mapping. *Remote Sensing of Environment*, 60(2): 174-186 [DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00180-0]
- Barnett T P, Adam J C and Lettenmaier D P. 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066): 303-309 [DOI: 10.1038/nature04141]
- Brubaker K L, Pinker R T and Deviatova E. 2005. Evaluation and comparison of MODIS and IMS snow-cover estimates for the continental United States using station data. *Journal of Hydrometeorology*, 6(6): 1002-1017 [DOI: 10.1175/JHM447.1]

- Buchelt S, Skov K, Rasmussen K K and Ullmann T. 2022. Sentinel-1 time series for mapping snow cover depletion and timing of snow-melt in Arctic periglacial environments: case study from Zackenberg and Kobbefjord, Greenland. *The Cryosphere*, 16(2): 625-646 [DOI: 10.5194/tc-16-625-2022]
- Carlsen T, Birnbaum G, Ehrlich A, Freitag J, Heygster G, Istomina L, Kipfstuhl S, Orsi A, Schäfer M and Wendisch M. 2017. Comparison of different methods to retrieve optical-equivalent snow grain size in central Antarctica. *The Cryosphere*, 11(6): 2727-2741 [DOI: 10.5194/tc-11-2727-2017]
- Chen H J. 2018. Wet Snow Mapping in Southern Ontario with Sentinel-1A Observations. Waterloo: University of Waterloo
- Chen J, Chen J, Liao A P, Cao X, Chen L J, Chen X H, He C Y, Han G, Peng S, Lu M, Zhang W W, Tong X H and Mills J. 2015. Global land cover mapping at 30m resolution: a POK-based operational approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103: 7-27 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.09.002]
- Colbeck S C. 1983. Theory of metamorphism of dry snow. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 88(C9): 5475-5482 [DOI: 10.1029/JC088iC09p05475]
- Crawford C J. 2015. MODIS Terra Collection 6 fractional snow cover validation in mountainous terrain during spring snowmelt using Landsat TM and ETM+. *Hydrological Processes*, 29(1): 128-138 [DOI: 10.1002/hyp.10134]
- Dozier J, Davis R E and Perla R. 1987. On the Objective Analysis of Snow Microstructure. *International Association of Hydrological Sciences Publication No. 162*. [s.n.]: 49-59
- Dozier J, Painter T H, Rittger K and Frew J E. 2008. Time-space continuity of daily maps of fractional snow cover and albedo from MODIS. *Advances in Water Resources*, 31(11): 1515-1526 [DOI: 10.1016/j.advwatres.2008.08.011]
- Fierz C, Armstrong R L, Durand Y, Etchevers P, Greene E, McClung D M, Nishimura K, Satyawali P K and Sokratov S A. 2009. The International Classification for Seasonal Snow on the Ground. IHP-VII Technical Documents in Hydrology N° 83, IACS Contribution N° 1. UNESCO: 80
- Gagliano E, Shean D, Henderson S and Vanderwilt S. 2023. Capturing the onset of mountain snowmelt runoff using satellite synthetic aperture radar. *Geophysical Research Letters*, 50(21): e2023GL105303 [DOI: 10.1029/2023GL105303]
- Grenfell T C and Warren S G. 1999. Representation of a nonspherical ice particle by a collection of independent spheres for scattering and absorption of radiation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D24): 31697-31709 [DOI: 10.1029/1999JD900496]
- Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V, Digirolamo N E and Bayr K J. 2002. MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 181-194 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00095-0]
- Hallikainen M. 1977. Dielectric Properties of Sea Ice at Microwave Frequencies. [s.n.]: 11293
- Hao X H, Wang J, Wang J, Zhang P and Huang C L. 2013. The measurement and retrieval of the spectral reflectance of different snow grain size on northern Xinjiang, China. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 33(1): 190-195 (郝晓华, 王杰, 王建, 张璞, 黄春林. 2013. 北疆地区不同雪粒径光谱特征观测及反演研究. *光谱学与光谱分析*, 33(1): 190-195) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2013)01-0190-06]
- Jun C, Ban Y F and Li S N. 2014. Open access to Earth land-cover map. *Nature*, 514(7523): 434-434 [DOI: 10.1038/514434c]
- Karbou F, James G, Durand P and Atto A M. 2021. Thresholds and distances to better detect wet snow over mountains with sentinel-1 image time series//Change Detection and Image Time Series Analysis 1: Unsupervised Methods. [s.l.]: John Wiley and Sons, Ltd: 127-144 [DOI: 10.1002/9781119882268.ch5]
- Kinar N J and Pomeroy J W. 2015. Measurement of the physical properties of the snowpack. *Reviews of Geophysics*, 53(2): 481-544 [DOI: 10.1002/2015RG000481]
- Kokhanovsky A A and Zege E P. 2004. Scattering optics of snow. *Applied Optics*, 43(7): 1589 [DOI: 10.1364/AO.43.001589]
- Koskinen J T, Pulliainen J T and Hallikainen M T. 1997. The use of ERS-1 SAR data in snow melt monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3): 601-610 [DOI: 10.1109/36.581975]
- Leppänen L, Kontu A, Vehviläinen J, Lemmetyinen J and Pulliainen J. 2015. Comparison of traditional and optical grain-size field measurements with SNOWPACK simulations in a taiga snowpack. *Journal of Glaciology*, 61(225): 151-162 [DOI: 10.3189/2015JoG14J026]
- Li S M, Yan H and Liu C. 2007. Study of snow detection using FY-2C satellite data. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 11(3): 406-413 (李三妹, 闫华, 刘诚. 2007. FY-2C 积雪判识方法研究. *遥感学报*, 11(3): 406-413) [DOI: 10.11834/jrs.20070356]
- Li X, Che T and Li X W. 2020. Cryosphere Remote Sensing. Beijing: Science Press. (李新, 车涛, 李新武. 2020. 冰冻圈遥感学. 北京: 科学出版社)
- Liang S L, Bai R, Chen X N, Cheng J, Fan W J, He T, Jia K, Jiang B, Jiang L M, Jiao Z T, Liu Y B, Ni W J, Qiu F, Song L L, Sun L, Tang B H, Wen J G, Wu G P, Xie D H, Yao Y J, Yuan W P, Zhang Y G, Zhang Y Z, Zhang Y T, Zhang X T, Zhao T J and Zhao X. 2020. Review of China's land surface quantitative remote sensing development in 2019. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 24(6): 618-671 (梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 程洁, 范闻捷, 何涛, 贾坤, 江波, 蒋玲梅, 焦子铤, 刘元波, 倪文俭, 邱凤, 宋柳霖, 孙林, 唐伯惠, 闻建光, 吴桂平, 谢东辉, 姚云军, 袁文平, 张永光, 张玉珍, 张云腾, 张晓通, 赵天杰, 赵祥. 2021. 2019年中国陆表定量遥感发展综述. *遥感学报*, 24(6): 618-671) [DOI: 10.11834/jrs.20209476]
- Libois Q, Picard G, France J L, Arnaud L, Dumont M, Carmagnola C M and King M D. 2013. Influence of grain shape on light penetration in snow. *The Cryosphere*, 7(6): 1803-1818 [DOI: 10.5194/tc-7-1803-2013]

- Liu H X, Wang L and Jezek K C. 2006. Automated delineation of dry and melt snow zones in Antarctica using active and passive microwave observations from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8): 2152-2163 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.872132]
- Marin C, Bertoldi G, Premier V, Callegari M, Brida C, Hürkamp K, Tschiersch J, Zebisch M and Notarnicola C. 2020. Use of Sentinel-1 radar observations to evaluate snowmelt dynamics in alpine regions. *The Cryosphere*, 14(3): 935-956 [DOI: 10.5194/tc-14-935-2020]
- Mätzler C and Schanda E. 1984. Snow mapping with active microwave sensors. *International Journal of Remote Sensing*, 5(2): 409-422 [DOI: 10.1080/01431168408948816]
- Nagler T and Rott H. 2000. Retrieval of wet snow by means of multi-temporal SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2): 754-765 [DOI: 10.1109/36.842004]
- Nagler T and Rott H. 2005. Snow classification algorithm for envisat ASAR//Proceedings of the 2004 Envisat and ERS Symposium. Salzburg: European Space Agency
- Nagler T, Rott H, Ripper E, Bippus G and Hetzenecker M. 2016. Advancements for snowmelt monitoring by means of sentinel-1 SAR. *Remote Sensing*, 8(4): 348 [DOI: 10.3390/rs8040348]
- Nolin A W. 2010. Recent advances in remote sensing of seasonal snow. *Journal of Glaciology*, 56(200): 1141-1150 [DOI: 10.3189/002214311796406077]
- Parajka J and Blöschl G. 2006. Validation of MODIS snow cover images over Austria. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(5): 679-689 [DOI: 10.5194/hess-10-679-2006]
- Pivot F C. 2012. C-Band SAR imagery for snow-cover monitoring at Treeline, Churchill, Manitoba, Canada. *Remote Sensing*, 4(7): 2133-2155 [DOI: 10.3390/rs4072133]
- Rondeau-Genesse G, Trudel M and Leconte R. 2016. Monitoring snow wetness in an Alpine Basin using combined C-band SAR and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 183: 304-317 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.06.003]
- Salomonson V V and Appel I. 2004. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index. *Remote Sensing of Environment*, 89(3): 351-360 [DOI: 10.1016/j.rse.2003.10.016]
- Su Y W. 2004. *Altay Regional Journal*. Urumqi: Xinjiang People's Press (苏勇文. 2004. 阿勒泰地区志. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社)
- Vandecrux B, Box J E, Wehrle A, Kokhanovsky A A, Picard G, Niwano M, Hörhold M, Faber A K and Steen-Larsen H C. 2022. The determination of the snow optical grain diameter and snowmelt area on the Greenland ice sheet using spaceborne optical observations. *Remote Sensing*, 14(4): 932 [DOI: 10.3390/rs14040932]
- Wang J, Che T, Dai L Y, Yue S N and Zheng Z J. 2023. Spatio-temporal comparison of snow depth between passive microwave remote sensing inversion data and meteorological station observation data. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(9): 2060-2071 (王静, 车涛, 戴礼云, 岳珊珊, 郑照军. 2023. 被动微波遥感反演雪深与气象站观测雪深时空对比. *遥感学报*, 27(9): 2060-2071) [DOI: 10.11834/jrs.20221653]
- Wang X Y, Wang J, Li H Y and Hao X H. 2017. Combination of NDSI and NDFS for snow cover mapping in a mountainous and forested region. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 21(2): 310-317 (王晓艳, 王建, 李弘毅, 郝晓华. 2017. NDSI与NDFS结合的山区林地积雪制图方法. *遥感学报*, 21(2): 310-317) [DOI: 10.11834/jrs.20176211]
- Warren S G. 2019. Optical properties of ice and snow. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 377(2146): 20180161 [DOI: 10.1098/rsta.2018.0161]
- Wiscombe W J and Warren S G. 1980. A model for the spectral albedo of snow. I: Pure snow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37(12): 2712-2733 [DOI: 10.1175/1520-0469(1980)037<2712:AMFTSA>2.0.CO;2]
- Woodhouse I H. 2006. *Introduction to Microwave Remote Sensing*. Boca Raton: Taylor and Francis
- Xiong C and Shi J C. 2018. Snow specific surface area remote sensing retrieval using a microstructure based reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, 204: 838-849 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.017]
- Xiong C, Shi J C, Ji D B, Wang T X, Xu Y L and Zhao T J. 2015. A new hybrid snow light scattering model based on geometric optics theory and vector radiative transfer theory. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(9): 4862-4875 [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2411592]
- Xiong C, Yao R Z, Shi J C, Lei Y H and Pan J M. 2019. Change of snow and ice melting time in High Mountain Asia. *Chinese Science Bulletin*, 64(27): 2885-2893 (熊川, 姚汝楨, 施建成, 雷永荟, 潘金梅. 2019. 高亚洲地区冰雪融化时间变化. *科学通报*, 64(27): 2885-2893) [DOI: 10.1360/TB-2019-0085]
- Zege E P, Katsev I L, Malinka A V, Prikhach A S, Heygster G and Wiebe H. 2011. Algorithm for retrieval of the effective snow grain size and pollution amount from satellite measurements. *Remote Sensing of Environment*, 115(10): 2674-2685 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.06.001]
- Zhang Y L and Zhang L P. 2020. Snow cover identification and area change in mountainous regions based on Sentinel-2 time series data. *Chinese Journal of Ecology*, 39(8): 2810-2820 (张彦丽, 张丽萍. 2020. 基于Sentinel-2时序数据的山区积雪识别与面积变化. *生态学杂志*, 39(8): 2810-2820) [DOI: 10.13292/j.1000-4890.202008.026]

## High-resolution snowmelt detection in mountainous areas based on remote sensing retrieved snow surface grain size variation

SUN Haijiao, XIONG Chuan, HAN Chenyang

*Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China*

**Abstract:** Snow seasonal evolution is one of the key factors influencing hydrological dynamics in mountainous areas and controlling terrestrial ecology. Accurate information on snowmelt is essential for meteorological, hydrological, and global climate change studies and for disaster prediction and early warning. The traditional snowmelt detection approach based on time-series SAR suffers from the influence of vegetation cover, rugged terrain, and long revisit time in some regions. In this study, we propose a new snowmelt detection method based on high resolution Sentinel-2 optical remote sensing data.

The time series snow surface grain size variation is used to detect snowmelt events. As snow starts to melt, the liquid water in snow tend to increase the optical equivalent grain size retrieved from optical remote sensing remarkably. When the wet snow refreezes, the optical equivalent grain size remains considerably larger than dry snow. This provides the theoretical basis for snowmelt onset detection from optical remote sensing. The snow surface optical equivalent grain size is retrieved by applying snow reflectance models, with bidirectional reflectance, sun zenith angle, sensor viewing angle, and relative azimuth angle as inputs. Pure snow pixels are selected for snow optical equivalent grain size retrieval and snowmelt detection. In this study, snowmelt detection results of the Altay Mountain are presented and analyzed. Snowmelt onset detection based on optical remote sensing is also compared with SAR method, and the advantages and shortcomings of the two methods are analyzed.

The main advantages of the proposed new method in this study are as follows The new method based on optical remote sensing is more sensitive in detecting the occurrence of snowmelt and provides richer information about the snow melting process. The choice of snow reflectance model can introduce differences in the retrieved snow grain size due to variations in modeling snow particle shape and light scattering and absorption. Additionally, the selection of threshold values for distinguishing between wet and dry snow grain sizes can affect the results. Therefore, the use of different snow reflectance models can lead to certain differences in the results of snowmelt detection. The snowmelt onset dates retrieved using the optical method show overall similarity to those retrieved from the SAR method, exhibiting similar dependencies on elevation and aspect. However, some differences between the two methods, which can be attributed to variations in detection principles and data sources, are observed. Compared with the SAR method, the optical method is less affected by speckle noise, mixed pixels, and vegetation cover. Particularly in low-elevation and vegetated areas, the proposed method demonstrates superior capability in detecting snowmelt events compared to the SAR method.

The snowmelt onset date retrieved using Sentinel-2 data is similar to those retrieved from the SAR method using Sentinel-1 data, and they show similar dependencies on elevation and aspect. The new method based on Sentinel-2 data also shows advantages over the SAR method, e.g., the optical method is less affected by speckle noise, mixed pixels, and vegetation cover, and it provides more spatial details about the snowmelt onset data. The proposed snowmelt detection method based on optical data suffers from cloud cover, but it offers an alternative way to detect wet snow with high spatial resolution other than SAR. The snowmelt detection based on SAR and Sentinel-2 data can be complementary to each other, and the snowmelt detection in mountainous area can be improved by combining both methods.

**Key words:** snow grain size, backscattering, snowmelt, SAR, optical remote sensing

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No.41871266)