

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0101

LI Xubing, HUANG Xiaodong, LIU Aili. Snow depth retrieval from spaceborne LiDAR ICESat-2[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3):1091-1099. [李旭冰, 黄晓东, 刘爱利. 基于星载激光雷达ICESat-2的雪深监测方法研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3):1091-1099.]

基于星载激光雷达 ICESat-2 的雪深监测方法研究

李旭冰¹, 黄晓东², 刘爱利¹

(1. 南京信息工程大学 地理科学学院, 江苏 南京 210044; 2. 兰州大学 草地农业科技学院
草地农业生态系统国家重点实验室, 甘肃 兰州 730020)

摘 要: 目前, 被动微波数据是积雪深度反演的主要数据源, 受其较粗空间分辨率的影响, 反演雪深存在较大的不确定性。激光雷达由于其较高的测高精度, 在雪深监测方面具有一定的潜力, 基于星载激光雷达 ICESat-2 数据对北疆地区 2018 年 10 月至 2019 年 9 月积雪季的雪深进行了提取。由于很难获取 ICESat-2 轨迹点的雪深观测资料, 因此首先利用地面雪深观测数据对目前流行的被动微波雪深反演产品进行验证, 获取精度可靠的雪深产品并与发展的 ICESat-2 监测雪深数据产品进行对比。结果表明: AMSR2 雪深产品在北疆地区误差较大, 整体存在高估现象, 中国雪深长时间序列雪深产品精度相对可靠, 以作为对比 ICESat-2 模拟雪深的参考数据; ICESat-2 雪深与中国雪深长时间序列雪深产品在空间上以及变化趋势方面吻合度较高, 但 ICESat-2 雪深变化更加连续, 说明 ICESat-2 激光雷达数据不但可以提取区域积雪的深度, 对积雪深度的空间变化也比被动微波数据更加敏感, 可以获取更加详细的积雪深度空间变化细节, 为精细化的积雪深度空间分布提供数据支撑。

关键词: 北疆; ICESat-2; 激光雷达; 雪深反演

中图分类号: P237; P468.0'25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)03-1091-09

0 引言

积雪是地球表面覆盖的重要组成成分^[1]。积雪作为全球气候系统中重要的要素之一, 在北半球的中、高纬度及高山地区广泛分布, 因其高活跃度和敏感度, 充当着全球气候变化指示器的角色^[2]。积雪持续时间长短及覆盖范围的大小, 将直接影响地表辐射与热量平衡, 影响地气系统的能量交换^[3]。在干旱和半干旱地区, 融雪水是十分关键的水资源, 对干旱区农业和畜牧业有直接影响。北疆位于我国西北地区的干旱和半干旱区, 是季节性积雪长期稳定分布的地区之一, 该地区的生产、生活和淡水补给都高度依赖融雪。随着气候的持续变暖, 积雪量减少且持续时间缩短, 融雪水资源和河川径流季节分配发生了明显变化, 导致该地区洪涝灾害频发^[4]。

积雪深度是积雪研究的重要方向之一, 也是预报、监测、警示融雪性洪涝灾害的重要因素^[5]。雪深

观测的主要方法包括地面观测和遥感数据观测。其中, 地面观测效率低, 数据稀疏且代表性差, 无法满足大面积积雪深度信息的观测要求^[6]。随着信息技术的飞速发展, 遥感技术从宏观角度对目标地物进行全天候和多时段反复观测, 可获取大范围、多时相、周期性的积雪信息, 为积雪研究提供了丰富的资料, 已成为动态监测雪深的必要手段。国内有学者尝试利用光学遥感数据构建雪深反演模型, 但缺乏内在的物理机制^[7]。目前, 被动微波数据是积雪深度和雪水当量反演最主要的数据源, 如 AMSR-E^[8]、FY3B-MWRI^[9]、SSM/I^[10]、AMSR2^[11]等。然而, 被动微波数据空间分辨率太粗, 受混合像元及复杂地形的影响, 在雪深和雪水当量反演中存在较大的不确定性。主动微波遥感特别是合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)以其更高的空间分辨率在积雪深度反演中具有很大的优势, 可以反演干雪的深度, 也可以

收稿日期: 2022-02-14; 修订日期: 2022-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971293)资助

作者简介: 李旭冰, 硕士研究生, 主要从事冰冻圈遥感研究. E-mail: lxb13921189095@163.com

通信作者: 黄晓东, 教授, 主要从事冰冻圈遥感与气候变化研究. E-mail: huangxd@lzu.edu.cn

反演不同干湿状态下积雪的湿度信息^[12]。

ICESat(ice, cloud, and land elevation satellite)是地球观测系统中一颗激光雷达测高卫星,主要用于测量冰盖质量平衡、云和气溶胶高度、以及地形和植被特征^[13]。在极地研究中,ICESat获取的高精度高程数据可用于确定海冰干舷、海冰厚度和海冰粗糙度^[14];另外,ICESat数据已被多次证明能够准确估计森林结构特征^[15]。在地形测量方面,ICESat获取的地面高程数据是评估数字高程模型垂直精度和水位的重要数据源^[16]。ICESat提供了云和气溶胶层分布的垂直剖面,为研究全球尺度的云层高度和厚度提供了重要参考^[17]。

国外已有学者尝试利用该数据提取区域尺度的积雪深度信息,如Kern等^[18]利用ICESat冬春两季的高程差计算雪深,并与AMSR-E雪深产品进行对比,发现ICESat获取的雪深与实际雪深数据更为一致。Treichler等^[19]以挪威南部的斯堪的纳维亚山脉为研究区,利用ICESat进行积雪深度提取,结果证明ICESat在雪深提取方面具备一定的潜力。2018年9月ICESat-2卫星正式启动,不同于ICESat使用的全波形仿真系统,ICESat-2配备的是先进地形激光测高仪系统(advanced terrain laser altimeter system, ATLAS),该系统采用的是多光束微脉冲激光技术。李龙等^[20]发现ICESat-2更加密集的激光足迹,相比ICESat可将湖泊观测数据增加至两倍以上,该数据未来将被广泛应用于湖泊水位监测领域^[21]。Kwok等^[22]利用2018年10月至2019年4月的ICESat-2数据与CryoSat-2数据的高度差,对北极

雪层的厚度进行估算,经验证发现该数据在雪深估算方面效果良好。

以上研究表明,ICESat以其高精度的测高能力,在积雪深度模拟方面具备一定的潜力。然而,已有研究大多在高纬度且积雪深度较厚的极地、北欧等地区开展。而我国积雪深度相对较浅,星载激光雷达在我国的积雪深度探测能力还未得到验证,因此,本文拟发展一套基于ICESat-2的雪深反演方法,以北疆为研究区,探索星载激光雷达数据在中国地区雪深模拟中的应用潜力。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

北疆地处我国天山山脉以北、阿尔泰山脉以南,中间是准噶尔盆地,地貌单元丰富,海拔落差大^[23]。该地区冬季积雪丰富,是我国三大积雪区之一,也是我国稳定积雪区分布的主要区域(图1)。由于地处干旱区,积雪作为重要的水资源,是该区农牧业生产以及生活用水的重要补给。ICESat卫星采用近极地非太阳同步重复轨道,因为北疆地区纬度较高,可在该地区获取较为密集的ICESat轨迹点数据。北疆冬季漫长,降雪丰富,积雪季较长,积雪空间分布不均,是发展和验证激光雷达卫星数据雪深反演方法的理想场所。

1.2 数据介绍

1.2.1 ICESat

ICESat即冰、云和陆地高程卫星,2003年由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space

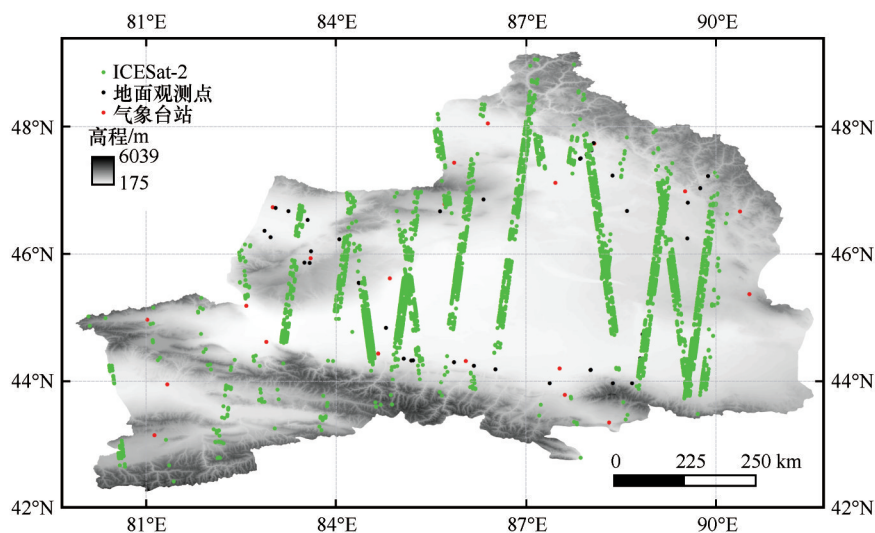


图1 北疆地区积雪深度地面观测站点及ICESat-2轨迹点(部分)空间分布图

Fig. 1 Distribution of the snow depth observations and ICESat-2 footprints (segment) in northern Xinjiang

Administration, NASA)发射,为全球第一个激光测高卫星,搭载了地球科学激光测高系统(geoscience laser altimeter system, GLAS),于2009年停止收集数据^[24]。ICESat-2作为ICESat的后续卫星搭载了先进地形激光测高仪系统(advanced topographic laser altimeter system, ATLAS)^[25]。ICESat-2用于数据采集的多波束光子计数平台优势在于激光仪以极高的重复频率(10 kHz)运作,极大地提高了沿轨道的分辨率,并提供更密集的数据覆盖范围和更高精度的数据集^[26],为雪深模拟提供更丰富的轨迹点高程数据(表1)。本文所需数据来自美国国家雪冰数据中心的陆地和植被高度数据集 ATL08 (<https://nsidc.org/data/atl08/>),时间范围为2018年10月14日至2019年9月6日。

表1 ICESat-2与ICESat参数对比
Table 1 Comparison between ICESat and ICESat-2

参数	ICESat	ICESat-2
数据集	GLAS	ATLAS
测量方法	能量波	光子计数
波长/nm	1 064/532	532
脉冲频率/Hz	40	10 k
波束数量	1	6
光斑直径/m	60~70	17.5
沿直线采样距离/m	172	0.7
重复周期/d	183	91

1.2.2 被动微波雪深数据集

因很难获取ICESat-2轨迹的实测数据对反演雪深进行精度评估,本文首先利用地面雪深观测资料评估目前流行的被动微波雪深反演产品,选择精度最可靠的被动微波雪深产品与本研究发展的ICESat-2雪深反演数据进行比较。虽然二者的空间分辨率相差较大,分别为17.5 m和25 km,但是被动微波雪深产品在雪深空间差异的模拟方面具有一定的可信度,因此可以间接反映激光雷达数据雪深探测的效果。

本研究使用2018年10月至2019年3月升轨(13:30 UTC)和降轨(01:30 UTC)的AMSR2雪深产品以及中国雪深长时间序列数据集。AMSR2数据来源于日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) G-Portal 网站(<https://gportal.jaxa.jp/gpr/index/index>)。该数据包括0.1°和0.25°两种空间分辨率^[27],为保证空间分辨率的一致性,本研究采用0.25°雪深产品。中国

雪深长时间序列数据集(China_SD)是一套基于多传感器的逐日被动微波遥感数据集,来自国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpd.ac.cn/zh-hans/>)。该数据集的亮度温度数据来自SMMR、SMM/I和SMMI/S这3个传感器,经过交叉订正,以提高不同传感器在时间上的数据一致性^[28]。该数据在不同区域采用了不同的算法,在40°N以北的地区,算法在Chang算法的基础上引入了森林覆盖率,同时引入了动态的反演系数;在40°N以南的地区则采用了Che算法^[29]。

1.2.3 雪深地面观测数据

雪深地面观测数据包括研究区22个气象台站提供的积雪深度观测数据以及研究时段获取的49个野外地面积雪深度观测数据。数据包括2018年10月14日至2019年3月31日共计2 545个有效雪深观测数据,该数据用于验证被动微波雪深产品的精度。

1.2.4 数字高程模型(digital elevation model, DEM)

数字高程模型来自飞船雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission, SRTM)获取的空间分辨率为90 m的数字高程数据(<http://www.usgs.gov>)。该数据垂直精度约16 m,水平精度约20 m。由于ICESat-2激光雷达光子能量存在过饱和、且易受到云尤其是低云的干扰,导致部分数据存在较大的误差。该误差可以采用与数字高程模型对比,设置一定的阈值进行误差校正的方法,获取较为可靠的地面高程测量点数据^[30]。

2 研究方法

2.1 数据预处理

利用HDFView-3.1.0读取ATL08/HDF5文件,使用Python语言对ATL08数据进行自动提取,获取时间(date)、经度(longitude)、纬度(latitude)、高程(h_te_best_fit)四个字段,并以日期为文件名导出csv文件。剔除ICESat-2高程与SRTM DEM差值超过16 m的数据点,进行数据质量控制^[30]。图1展示了ICESat-2经过质量控制后的部分沿轨迹分布的高程测量点,可以发现在经过质量控制后的ICESat-2在地形复杂地区尤其是山区,出现了大量的数据空缺。本研究将2018年10月14日至2019年3月31日的数据作为积雪季数据,代表该阶段的高程数据,以记录来自积雪表面反射回的激光波束得到的高程值。2019年4月1日至2019年9月30日作为无积雪覆盖的数据,代表无积雪覆盖的陆地表面高程值。

2.2 空间插值

ICESat-2 的重复周期是 91 d,但重复轨道并不完全重合,轨迹点存在漂移,不能采用冬季的轨迹点直接与无积雪覆盖的轨迹点求取高程差值进行雪深提取。本研究首先利用研究时段无积雪覆盖的所有轨迹点数据进行区域插值生成高程面,然后利用冬季的 ICESat-2 轨迹点数据与参考面相减获取逐个轨迹点的高程差,即为雪深。空间插值包括精确插值和非精确插值,其中精确插值生成的曲面通过控制点,即控制点位置的数值不发生变化,为了保证重复轨迹高程之间的差值误差达到最小,本研究最终采用反距离权重精确插值法(inverse distance weighted, IDW)对无积雪覆盖的轨迹点数据进行插值,距离权重设置为 2,生成参考面。

2.3 雪深提取

基于空间插值的参考高程面,提取冬季 ICESat-2 逐日轨迹点对应的高程值(E_{nonsnow}),计算冬季 ICESat-2 高程值(E_{snow})与参考高程值 E_{nonsnow} 之间的差值,即为雪深值(snow depth, SD),单位为 cm[见式(1)]。最后,对提取的雪深值以 0~1 m 的范围进行筛选,剔除具有明显误差的数值,由此获取冬季过境的逐轨迹雪深点数据。

$$SD = (E_{\text{snow}} - E_{\text{nonsnow}}) \times 100$$

(1)

3 结果与分析

3.1 被动微波雪深产品精度评价

基于地面雪深观测数据,对 AMSR2 和中国雪

深长时间序列数据集(China_SD)进行了精度评价,并比较了雪深数据集在不同土地覆盖类型下的精度,评价结果如表 2 所示。AMSR2 包括升轨(AMSR2_A)和降轨(AMSR2_D)两种雪深产品,总体而言,误差表现显示升轨数据产品的精度优于降轨产品。但是 AMSR2 所有产品对北疆地区的积雪深度存在高估,误差均大于零,尤其是降轨的 AMSR2 雪深产品高估更为严重,25 km 的降轨雪深产品平均高估了约 10.94 cm。均方根误差也显示升轨产品优于降轨产品。China_SD 雪深时间序列产品在北疆地区的精度要优于 AMSR2 雪深产品,均方根误差为 9.03 cm,但整体平均偏差为 4.05 cm,对该地区的雪深存在低估。土地覆盖类型对被动微波雪深反演产品的精度都有影响,不同土地覆盖类型对被动微波雪深反演产品影响的程度不一致,但 AMSR2 雪深升轨产品在不同土地覆盖类型下精度都优于降轨产品,草地、农田和城市区域的积雪深度误差相对较大,裸地表现明显优于其他地表。China_SD 雪深产品在不同土地覆盖类型下雪深反演精度均优于 AMSR2,城镇和裸地精度相对较好。整体而言,AMSR2 雪深产品在北疆地区精度不高且误差较大,整体存在高估现象,不能准确地反映北疆地区雪深状况。China_SD 雪深产品精度相对可靠,虽然存在一定的低估,但整体精度可以代表北疆地区雪深空间分布特点,可以作为本文评估 ICESat-2 模拟雪深的参考数据。

表2 被动微波雪深产品精度验证
Table 2 Accuracy evaluation of passive microwave snow depth products

产品	土地类型	有效站点数	平均雪深/cm	站点平均雪深/cm	平均偏差/cm	均方根误差/cm
AMSR2_A(25 km)	草地	578	20.49	19.97	0.52	18.64
	农田	310	15.18	17.78	-2.60	15.60
	城市	1 143	14.10	10.76	3.35	12.86
	裸地	238	10.88	10.97	-0.09	5.34
	总计	2 269	15.54	14.08	1.45	14.42
AMSR2_D(25 km)	草地	584	34.49	19.98	14.51	26.14
	农田	315	25.96	17.71	8.25	21.61
	城市	1 153	21.59	10.85	10.74	17.30
	裸地	578	20.49	19.97	0.52	18.64
	总计	310	15.18	17.78	-2.60	15.60
China_SD(25 km)	草地	1 143	14.10	10.76	3.35	12.86
	农田	238	10.88	10.97	-0.09	5.34
	城市	2 269	15.54	14.08	1.45	14.42
	裸地	584	34.49	19.98	14.51	26.14
	总计	315	25.96	17.71	8.25	21.61

3.2 ICESat-2 雪深评估

根据气象站点和实测点数据获取的雪深数据, 北疆地区积雪季根据积雪深度累积状况可以分为积雪积累期(10—12月)、稳定期(1—2月)和消融期(3—5月)三个阶段, 雪深峰值一般出现在2月末。为了评估本研究基于 ICESat-2 反演的雪深数据, 分别选择2018年12月23日(积累期)、2019年1月3日和2月19日(稳定期)、2019年3月6日(消融期)的4条雪深轨迹点数据的 China_SD 雪深产品进行对比分析(图2)。如图所示, 不同积雪期 ICESat-2 反演雪深值在空间上与 China_SD 雪深产品一致性较

高。如图2(a)显示12月23日积雪积累期 ICESat-2 雪深轨迹点分布, 有效雪深点数据为101个, 雪深值范围0.9~14.0 cm。China_SD 整体雪深值范围0.3~18.9 cm, 高值主要分布在阿尔泰山和天山山脉, 二者雪深值空间分布显示出很好的一致性。随着积雪的不断累积, 积雪深度不断增加, ICESat-2 探测到雪深的变化, 并与 China_SD 雪深产品在不同积雪季都表现出较好的一致性。相比被动微波较粗的空间分辨率, ICESat-2 可以提供更加密集的雪深轨迹点数据, 也比人工雪深观测高效省时, 丰富了雪深观测的手段。

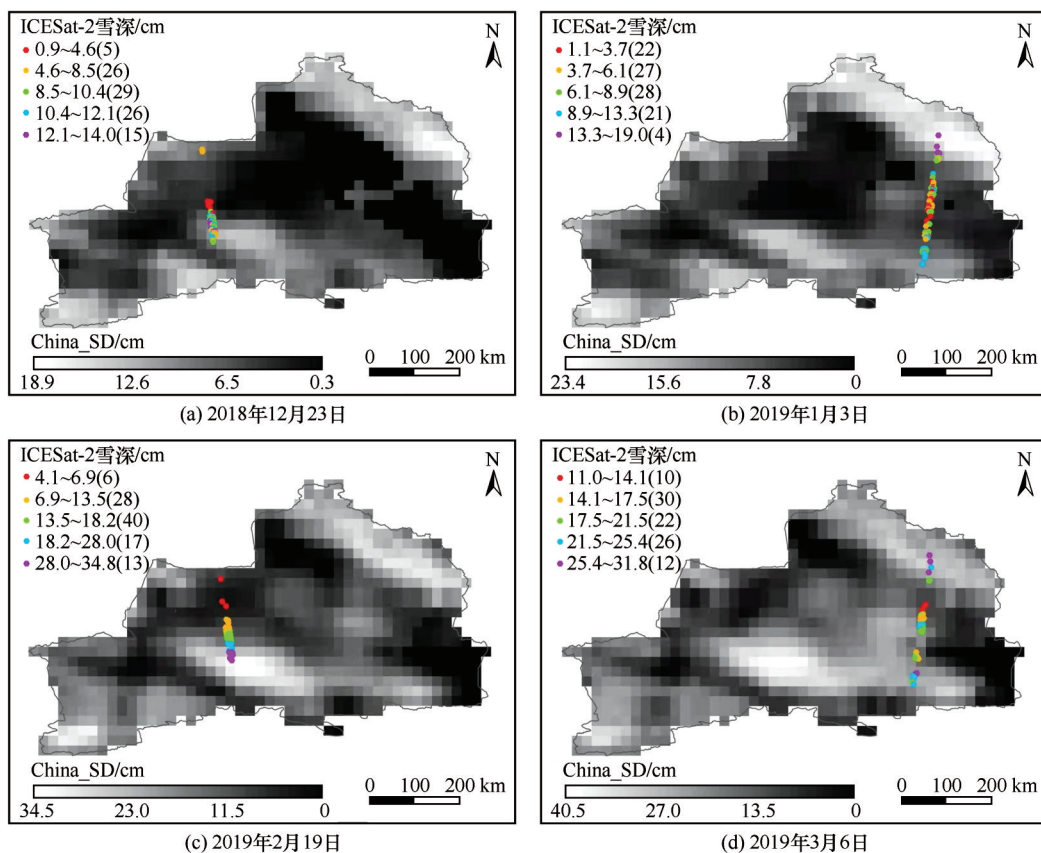


图2 ICESat-2雪深轨迹点与China_SD雪深空间分布图(括号内为有效雪深轨迹点数量)

Fig. 2 Schematic diagram of ICESat-2 snow depth footprints and passive microwave snow depth spatial distribution (in brackets is the number of effective snow depth footprints)

图3显示了不同积雪季 ICESat-2 雪深轨迹点与 China_SD 雪深数据沿轨迹点雪深变化的对比。二者雪深变化的总体趋势较为一致, 但 China_SD 雪深变化较为陡峭, 不够平缓, 而 ICESat-2 雪深值具有一定的波动, 连续性较好, 对雪深的变化更为敏感。图3(a)显示2018年12月23日积雪积累期的 ICESat-2 反演雪深与 China_SD 雪深变化对比, 其中 ICESat-2 反演得到的平均雪深为9.6 cm, 最大雪深为

14.0 cm。ICESat-2 雪深值整体变化趋势与 China_SD 基本一致, 但 ICESat-2 波动较为强烈, 变化较为连续, 相比被动微波产品更能捕捉到积雪的变化细节。积雪稳定期的雪深较厚, 平均雪深大于15 cm, ICESat-2 与 China_SD 雪深吻合度依然很高, ICESat-2 的波动相比积累期平缓, 但依然表现出对雪深变化更敏感的特性, 说明 ICESat-2 激光雷达数据不但可以提取区域积雪的深度, 而且对积雪深度

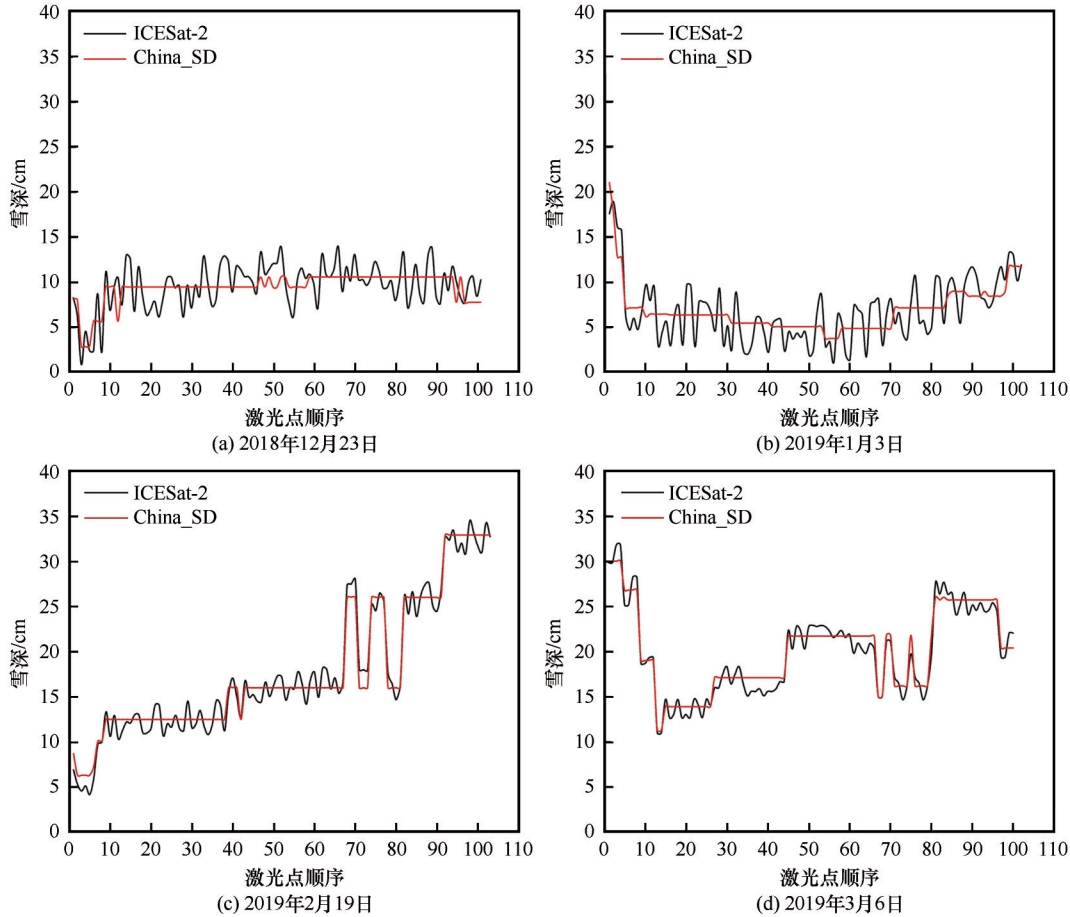


图3 ICESat-2沿轨迹点雪深与被动微波雪深对比
Fig. 3 Comparison of ICESat-2 and passive microwave snow depth along orbit footprints

的空间变化也比被动微波数据更加敏感,可以获取更加详细的积雪深度空间变化细节,为精细化积雪深度空间分布提供数据支撑。

图4显示了研究时段不同积雪季ICESat-2雪深轨迹点与China_SD雪深数据沿轨迹点在经度方向的对雪深对比。结果显示,ICESat-2监测雪深与China_SD具有很高的一致性,仅在雪深小于5 cm时,二者的差异较大,China_SD积雪深度反演值大

多为0,而ICESat-2可以探测到更多的轨迹点浅雪深度。例如在积雪积累期,处于降雪初期,积雪深度较浅,最大值不超过20 cm,二者的决定系数仅为0.789,主要是由于China_SD浅雪反演能力差造成。随着积雪的不断累积,积雪厚度不断增加,二者的一致性有所提高,在消融期达到最高,这是由于研究时段获取的ICESat-2数据为3月,此时应处于消融初期,因此最大雪深较稳定期高,决定系数为0.951。

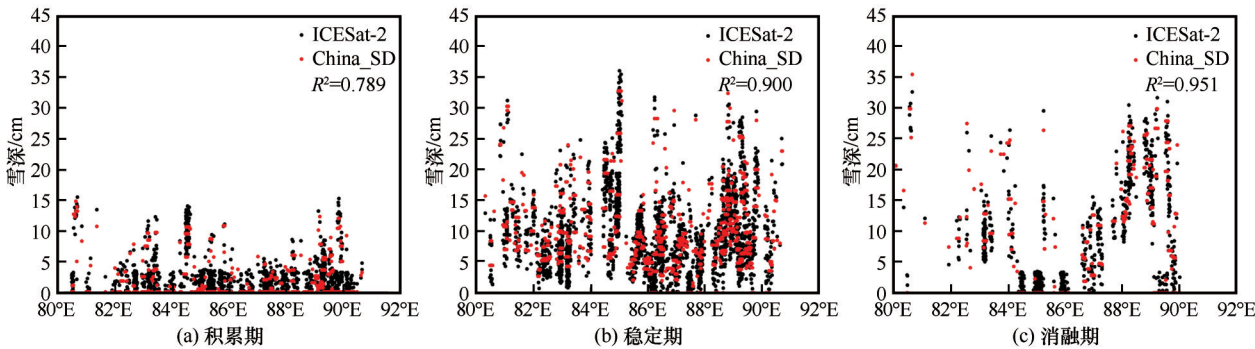


图4 ICESat-2雪深与被动微波雪深比较
Fig. 4 Comparison of ICESat-2 and passive microwave snow depth

4 结论

被动微波雪深产品是目前广泛用于评估区域乃至全球积雪的主要数据源,因其较粗的空间分辨率,且缺乏细节的空间信息,因此仅适用于大范围的积雪深度趋势变化分析,在积雪定量评估中存在很大的不确定性。主动微波遥感尤其是SAR数据在湿雪深度反演方面具有局限性,雪深反演模型的机理复杂,必须建立严格物理意义的积雪辐射传输模型,输入参数较多,模型的构建和求解过程困难^[12]。激光雷达获取地物表面的反射信号,不受积雪特性包括含水量的干扰,以其高精度的测高数据,在积雪深度探测方面具有广泛的应用前景。

北疆地区是中国季节性积雪最为丰富的地区之一。本文选取的ICESat-2激光雷达数据,探索了其在积雪深度反演中的应用潜力。研究表明,使用无积雪覆盖季节的ICESat-2数据进行插值生成参考高程面,与冬季ICESat-2过境轨迹数据对比可以提取积雪深度信息,具备区域积雪深度的提取潜力。与经过验证的中国长时间序列雪深产品进行对比,基于ICESat-2数据提取的雪深与被动微波雪深产品具有很高的一致性,但ICESat-2可以获取更加连续的积雪深度空间变化信息。相比被动微波数据,激光雷达对积雪深度的空间变化更加敏感,可以获取更加详细的积雪深度变化细节。该数据的大范围推广,可为精细化积雪深度空间分布监测提供更加丰富的数据源,也为进一步发展和完善积雪深度遥感反演模型提供参考数据。

然而,ICESat-2激光雷达数据受到低云以及能量饱和的影响,导致大量错误数据会对本研究发展的雪深提取方法造成极大的影响,因此在数据预处理之前,对数据质量进行控制是非常必要的。另外,本文基于有无积雪覆盖的ICESat-2高程数据之差提取积雪深度的方法,也存在一定的改进空间。如基于空间插值方法对无积雪覆盖的高程轨迹点数据进行空间化,形成的参考面数据会受到插值方法的严重影响,进而导致提取的雪深产生较大的误差,尤其是无高程轨迹过境的区域。因此,高精度的地面数字高程数据,是否可以进一步改善ICESat-2雪深提取精度的重要数据源,还有赖于后续研究者的不断改进和创新。最后,如何验证ICESat-2雪深提取的准确性也是一个非常重要的问题,沿高程轨迹点进行人工测量雪深可以提供可靠的验证数据,但这种方法需要投入大量的人力物力,而发展

基于主动雷达数据的高精度雪深反演方法是一个有效的途径,可为进一步完善和验证ICESat-2雪深提取方法奠定基础。

参考文献(References):

- [1] Guo Hui, Chen Siyong, Wang Xiaoyan. Estimation of fraction of snow cover in Northeast China based on MODIS data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(5): 1183-1191. [郭慧, 陈思勇, 王晓艳. 基于MODIS数据的东北地区积雪覆盖率估算[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(5): 1183-1191.]
- [2] Ma Rong. Characteristics and causes of snow change in arid Northwest China from 1979 to 2016[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2018. [马荣. 1979—2016年西北干旱区积雪变化特征及其成因分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2018.]
- [3] Wang Qiuxiang, Wei Wenshou. The response of snow cover in northern Xinjiang to climate change [C]// The 27th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society on climate change: eternal themes of human development. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2010: 685-691. [王秋香, 魏文寿. 北疆积雪对气候变化的响应[C]//第27届中国气象学会年会应对气候变化分会场: 人类发展的永恒主题. 北京: 中国气象学会, 2010: 685-691.]
- [4] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): hydrological effects [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 513-527. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 513-527.]
- [5] Chen Xiuxue, Li Xiaofeng, Wang Guangrui, et al. Based on snow cover survey data of accuracy verification and analysis of passive microwave snow cover remote sensing products in Northeast China[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(6): 1181-1189. [陈秀雪, 李晓峰, 王广蕊, 等. 基于积雪调查数据的东北地区被动微波积雪遥感产品精度验证与分析[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(6): 1181-1189.]
- [6] Cordisco E, Prigent C, Aires F. Snow characterization at a global scale with passive microwave satellite observations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D19): D19102.
- [7] Liu Yan, Zhang Pu, Zhang Mengjun, et al. The retrieval of snow depth in Tianshan northern slope economic zone from MODIS data[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(3): 15-17. [刘艳, 张璞, 张盟君, 等. 基于MODIS数据的天山北坡经济带雪深反演研究[J]. *测绘科学*, 2006, 31(3): 15-17.]
- [8] Lu Xinyu, Wang Xiuqin, Cui Caixia, et al. Snow depth retrieval based on AMSR-E data in northern Xinjiang region, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(1): 40-47. [卢新玉, 王秀琴, 崔彩霞, 等. 基于AMSR-E的北疆地区积雪深度反演[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(1): 40-47.]
- [9] Li Changchun, Xu Xuan, Bao Anming, et al. The study on snow depth retrieval in Xinjiang region based on FY3B-MWRI data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(6): 1030-1036. [李长春, 徐轩, 包安明, 等. 基于FY3B-MWRI数据新疆区域积雪深度反演[J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(6): 1030-1036.]
- [10] Papa F, Legresy B, Mognard N M, et al. Estimating terrestrial snow depth with the TOPEX-Poseidon altimeter and radiometer [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*,

- 2002, 40(10): 2162-2169.
- [11] Lee Y K, Kongoli C, Key J. An in-depth evaluation of heritage algorithms for snow cover and snow depth using AMSR-E and AMSR2 measurements[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2015, 32(12): 2319-2336.
- [12] Li Hui, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi, et al. Snow depth derived from repeat-pass InSAR sounding[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 517-526. [李晖, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 基于重轨 InSAR 的积雪深度反演方法[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(3): 517-526.]
- [13] Chen Guodong, Zhang Shengjun. Elevation and volume change determination of Greenland Ice Sheet based on ICESat observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(7): 2417-2428. [陈国栋, 张胜军. 利用 ICESat 数据确定格陵兰冰盖高程和体积变化[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(7): 2417-2428.]
- [14] Kwok R, Zwally H J, Yi Donghui. ICESat observations of arctic sea ice: a first look[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L16401.
- [15] Pritchard H D, Ligtenberg S R M, Fricker H A, et al. Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves[J]. *Nature*, 2012, 484(7395): 502-505.
- [16] Beaulieu A, Clavet D. Accuracy assessment of Canadian digital elevation data using ICESat[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2009, 75(1): 81-86.
- [17] Naud C, Muller J-P, de Valk P. On the use of ICESat-GLAS measurements for MODIS and SEVIRI cloud-top height accuracy assessment[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(19): 307-323.
- [18] Kern S, Ozsoy-Çiçek B. Satellite remote sensing of snow depth on Antarctic sea ice: an inter-comparison of two empirical approaches[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(6): 450.
- [19] Treichler D, Kääb A. Snow depth from ICESat laser altimetry: a test study in southern Norway[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 191: 389-401.
- [20] Li Long, Yao Xiaojun, Li Fengxian, et al. Study on monitoring lake water level changes in the Hoh Xil region based on ICESat/GLAS data[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(3): 45-52. [李龙, 姚晓军, 李风贤, 等. 基于 ICESat/GLAS 数据的可可西里地区湖泊水位变化研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(3): 45-52.]
- [21] Zhang Guoqing, Chen Wenfeng, Xie Hongjie. Tibetan Plateau's lake level and volume changes from NASA's ICESat/ICESat-2 and Landsat missions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(22): 13107-13118.
- [22] Kwok R, Kacimi S, Webster M A, et al. Arctic snow depth and sea ice thickness from ICESat-2 and CryoSat-2 freeboards: a first examination[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(3): e2019JC016008.
- [23] Wu Yanfeng. Spatiotemporal variation of meteorological drought in north Xinjiang Province from 1961 to 2012[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016. [吴燕锋. 北疆近 52 年气象干旱时空演变特征[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.]
- [24] Wen Hanjiang, Cheng Pengfei. Introduction to principle of ICESAT/GLAS laser altimetry and its applications[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2005, 30(5): 33-35. [文汉江, 程鹏飞. ICESAT/GLAS 激光测高原理及其应用[J]. *测绘科学*, 2005, 30(5): 33-35.]
- [25] Wei Yarui, Hao Xiaohua, Wang Jian, et al. Retrieval and analysis of spatiotemporal variation of snow black carbon and snow grain size in northern Xinjiang based on MODIS data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(5): 1192-1204. [魏亚瑞, 郝晓华, 王建, 等. 基于 MODIS 数据的北疆积雪黑碳和雪粒径反演及时空变化分析[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(5): 1192-1204.]
- [26] Yao Jiaqi, Tang Xinming, Li Guoyuan, et al. Cloud detection of laser altimetry satellite ICESat-2 and the related algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 131408. [么嘉祺, 唐新明, 李国元, 等. 激光测高卫星 ICESat-2 云检测及其相关算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 131408.]
- [27] Deng Jie, Huang Xiaodong, Ma Xiaofang, et al. Downscaling algorithm and verification of AMSR2 snow cover depth products in north Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(6): 1181-1188. [邓婕, 黄晓东, 马晓芳, 等. 新疆北部 AMSR2 雪深产品降尺度算法及验证[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(6): 1181-1188.]
- [28] Che Tao, Li Xin, Jin Rui, et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China[J]. *Annals of Glaciology*, 2008, 49(1): 145-154.
- [29] Xiao Lin, Che Tao, Dai Liyun. Evaluation on the spatial characteristics of multiple snow depth datasets over China[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(6): 1133-1145. [肖林, 车涛, 戴礼云. 多源雪深数据在中国的空间特征评估[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(6): 1133-1145.]
- [30] Huang Xiaodong, Xie Hongjie, Zhang Guoqing, et al. A novel solution for outlier removal of ICESat altimetry data: a case study in the Yili watershed, China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2013, 7(2): 217-226.

Snow depth retrieval from spaceborne LiDAR ICESat-2

LI Xubing¹, HUANG Xiaodong², LIU Aili¹

(1. School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China)

Abstract: At present, passive microwave data is the main data source for snow depth retrieval, and there is large uncertainty in snow depth retrieval due to its coarser spatial resolution. Due to its high measurement accuracy, LiDAR has a specific potential in snow depth retrieval. This study tries to extract the snow depth of the snow season from October 2018 to September 2019 in the northern Xinjiang region based on the spaceborne LiDAR ICESat-2 data. Since it is difficult to obtain snow depth observation data at the ICESat-2 footprints, thus, this study first uses ground snow depth observations to verify the current popular passive microwave snow depth products and then obtains reliable snow depth products, which are compared with the ICESat-2 snow depth data produced in this study. The results show that the AMSR2 snow depth product has a large error and overall overestimation in northern Xinjiang. The long-term sequence of snow depth dataset in China (CHINA_SD) is relatively reliable, and which is used as a reference data for evaluating the simulated snow depth from ICESat-2; ICESat-2 snow depth is highly consistent with the snow depth products of CHINA_SD in terms of space and change trend, but ICESat-2 snow depth changes more continuously, indicating that ICESat-2 can not only extract the snow depth in regional, but also be more sensitive to the spatial change of snow depth than passive microwave data, and can obtain more details of snow depth spatial change, providing data support for refining the spatial distribution of snow depth.

Key words: northern Xinjiang; ICESat-2; LiDAR; snow depth retrieval

(责任编辑：戴礼云)