

国产卫星激光测高数据极地应用实践

郭金权^{1,2,3,4}, 李国元^{2,5*}, 庞小平^{1,3,4*}, 神栋梁^{2,3}, 丁宝帅^{2,6}

- (1. 武汉大学 中国南极测绘研究中心, 湖北 武汉 430079;
2. 自然资源部 国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;
3. 极地环境监测与公共治理教育部重点实验室, 湖北 武汉 430079;
4. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079;
5. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590;
6. 苏州吉天星舟空间技术有限公司, 江苏 苏州 215028)

摘要: 极地区域在全球气候系统中扮演着关键角色, 是气候变化的指示器和放大器, 其独特的地理环境和气候过程对地球系统具有显著影响。激光测高技术以亚米级甚至厘米级的测高精度, 在极地研究中备受关注。近年来, 我国搭载激光测高载荷的卫星逐步增多, 但少有基于国产卫星测高数据开展的极地研究, 文章首先使用参考地形验证国产卫星激光测高数据极地高程精度, 结果表明高分七号与资源三号 03 星激光数据在极地区域精度均优于 1 m, 陆碳监测卫星约为 1.2 m; 以激光测高数据辅助立体影像构建极地区域三维地形, 地形产品成果满足 1:10000 地形图制图标准, 证明了复合测绘方法在极地区域的有效性; 最后联合多源激光测高数据计算冰盖表面高程变化, 分析国产卫星在极地变化监测上的应用潜力。文章从多个角度综合评估了国产卫星激光测高数据极地应用能力, 可为后续基于国产卫星数据开展大规模极地研究提供重要参考。

关键词: 卫星激光测高; 极地应用; 三维地形构建; 高程变化监测; 应用潜力评估
中图分类号: P237 **文献标识码:** A

Polar application practice of Chinese satellite laser altimetry data

GUO Jin-Quan^{1,2,3,4}, LI Guo-Yuan^{2,5*}, PANG Xiao-Ping^{1,3,4*}, SHEN Dong-Liang^{2,3}, DING Bao-Shuai^{2,6}

- (1. Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources of China, Beijing 100048, China;
3. Key Laboratory of Polar Environment Monitoring and Public Governance (Wuhan University), Ministry of Education, Wuhan 430079, China;
4. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
5. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
6. Suzhou Jitian Argo Space Technology Co., LTD, Suzhou 215028, China)

Abstract: Polar regions play a crucial role in the global climate system, serving as indicators and amplifiers of climate change. Their unique geographical environment and climate processes have a significant impact on the Earth system. Laser altimetry technology, with its sub-meter or even centimeter-level measurement accuracy, has received much attention in polar research. In recent years, the number of satellites carrying laser altimetry payloads in China has gradually increased. However, there are few polar studies based on the altimetry data from Chinese satellites. This paper first verifies the polar elevation accuracy of domestic satellite laser altimetry data using reference terrain. The results demonstrate that the laser data from GF-7 and ZY-3 03 satellites achieve accuracies better than 1 meter in polar regions, while

收稿日期: 2025-03-28, 修回日期: 2025-07-21

Received date: 2025-03-28, Revised date: 2025-07-21

基金项目: 国家民用航天预研项目(D030104); 自然资源部科技创新人才项目(BO2202); 武汉市自然科学基金项目(2024040701010030); 中央高校基本科研业务费专项资金

Foundation items: Supported by the National Civil Aerospace Pre-research Project (D030104); the Science and Technology Innovation Talent Program of the Ministry of Natural Resources (China) (BO2202); the Natural Science Foundation of Wuhan (2024040701010030); the Fundamental Research Funds for the Central Universities

作者简介 (Biography): 郭金权 (1996-), 辽宁鞍山人, 博士研究生, 主要研究领域为激光测高数据处理与极地应用. E-mail: guojinquan0516@fox-mail.com

* 通讯作者 (Corresponding authors): E-mail: ligy@lasac.cn; pxp@whu.edu.cn

the Terrestrial Carbon Monitoring Satellite exhibits an accuracy of approximately 1.2 meters. Subsequently, laser altimetry data is employed to assist in constructing three-dimensional polar terrain from stereo imagery, with the resulting topographic products meeting the cartographic standards for 1:10,000 scale topographic maps, thereby validating the effectiveness of the composite surveying and mapping method in polar regions. Finally, multi-source laser altimetry data is integrated to calculate ice sheet surface elevation changes, revealing the application potential of domestic satellites in polar change monitoring. This study comprehensively evaluates the polar application capabilities of domestic satellite laser altimetry data from multiple perspectives, providing critical references for future large-scale polar research utilizing domestic satellite data.

Key words: satellite laser altimetry, polar applications, three-dimensional terrain construction, elevation change monitoring, application potential assessment

引言

极地作为全球大气系统的关键冷源,在气候调节中发挥着不可替代的作用。在全球变暖的背景下,极地冰川、冰湖等自然要素对气候变化的响应机制已成为研究热点^[1-2]。受限于极地恶劣的自然地理环境,传统地面观测手段难以实现大范围持续监测,卫星遥感技术凭借其全天候、大范围、多尺度和周期性观测的独特优势,可以突破地理屏障与极端气候条件的限制,在极地的研究中有不可替代的优越性^[3-4]。

近年来激光测高技术凭借亚米甚至厘米级的测量精度、广域覆盖能力和长时间序列监测优势,成为极地冰川地形构建和长时序变化监测研究的重要技术手段^[5-6]。激光测高载荷从卫星平台按一定的波长和频率向地表发射激光脉冲信号,测量激光脉冲信号在星地之间的往返时间,进而精确计算激光脉冲的单向传输距离,再结合激光指向和卫星精密轨道姿态参数,最终获得足印范围内的地表高程值^[7]。2003年美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射了全球首颗对地观测激光测高卫星,即冰、云和陆地高程卫星(Ice, Cloud and land Elevation Satellite, ICESat),其上搭载了地球科学激光测高系统(Geoscience Laser Altimeter System, GLAS),该卫星数据被广泛应用于极地冰盖和海冰变化监测、云和气溶胶的分布与垂直结构分析、陆地地形的植被特征参数获取等研究^[8]。得益于ICESat的巨大成功,NASA于2018年发射了ICESat-2(Ice, Cloud and land Elevation Satellite 2, ICESat-2),其上搭载了先进地形激光测高系统(Advanced Topographic Laser Altimeter System, ATLAS),首次将光子体制激光测高技术应用于获取全球范围的地表高程,10 kHz的激光重复频率对应地表足印间距仅为0.7 m,为开展极地冰川变

化监测研究、分析全球气候演变趋势及估算森林生物总量等提供更为精细化的可靠观测数据^[9-10]。我国虽然尚未建成专用的极地观测激光测高卫星系统,但已成功发射多颗搭载有效激光测高载荷的对地观测卫星。2016年发射的资源三号02星搭载了试验性激光测高载荷,成功实现了试验性激光测高载荷对地观测的高程有效测量^[11],为后续业务化载荷部署积累了大量技术经验;2019年发射的高分七号卫星配备了具有全波形记录功能和业务化应用能力的激光测高载荷^[12-13],其获取的数据已被应用于高程控制点获取、大型湖泊水位监测等领域;2020年发射的资源三号03星在原有资源三号02星基础上进行升级,其激光测高载荷激光测高仪升级为业务化载荷,主要用于获取高精度的高程控制点;2022年发射的陆碳监测卫星,其上搭载了五波束激光测高系统载荷,主要应用于全球植被高度反演、森林结构调查和森林生物量估算等,结合同平台的多角度多光谱相机采集的光学影像,可实现区域1:50 000测绘产品制作。

本研究聚焦国产卫星激光测高数据极地测绘应用实践,首先基于南极参考地形数据验证了国产激光测高数据在极地区域的高程精度,再融合激光测高数据与立体影像构建极地区域高精度三维地形,最后联合早期ICESat激光测高数据开展2004—2023年间极地试验区表面高程变化监测。本文深入分析国产激光测高数据在极地研究中的实际应用能力和不足,为后续我国发展极地专用激光测高卫星提供相关参考。

1 国产卫星激光测高系统介绍

1.1 资源三号系列卫星

资源三号卫星是我国首个高分辨率民用立体测绘卫星星座,01、02、03星分别于2012年、2016年和2020年发射升空,可服务于1:50 000比例尺测绘

产品生产,以及1:25 000及更大比例尺地形图的修测与更新^[14]。其中02、03星搭载了激光测高载荷,02星上搭载了国内首台对地观测试验性激光测高载荷,主要用于测试激光测高仪的功能和性能。载荷采用单波束设计,中心波长1 064 nm,工作重频率2 Hz,对应地面光斑间隔约3.5 km,光斑直径设计值约75 m,实际验证结果约120 m,在坡度<2°地形条件下,测距精度约1 m。03星在02星试验性载荷的基础上优化,增加备份激光器,激光发散角从150 μrad 缩小为90 μrad,对应地面光斑大小约45 m,采用前后沿鉴别的方式,具有多阈值探测能力,在坡度<5°地形条件下测距精度优于0.3 m^[15]。

1.2 高分七号卫星

高分七号卫星是我国首颗民用亚米级光学传输立体测绘卫星,可满足我国民用1:10 000比例尺立体测图需求。该星配备两线阵立体相机和我国首台具有全波形记录和采样的激光测高仪,其中激光测高分系统采用双波束设计,工作波1 064 nm,发射频率3 Hz,地面激光足印沿轨间隔约2.4 km,垂轨间隔约12.25 km,在20 km×20 km幅宽的同平台线阵影像范围内按照左右2列、16个激光点的形式分布。激光测高系统搭配足印相机,在发射激光脉冲的同时获取激光足印地表影像,可用于实现激光与影像几何关联^[16]。

1.3 陆地生态碳监测卫星

陆地生态系统碳监测卫星(简称“陆碳监测卫星”),于2022年8月成功发射,是世界首颗以森林碳储量调查为主要任务的主被动联合观测遥感卫星^[17]。陆碳卫星主载荷为多波束激光雷达系统,波束植被激光雷达系统由5个具有全波形记录功能的激光器组成,按5波束、40 Hz进行对地探测,每个波束的激光点在沿轨方向间距约为180 m,垂轨方向激光波束的间距约为3.8 km。光轴监视相机成像频率与激光发射频率一致,地面分辨率约为8 m,用以记录激光光束的出射方向和地物影像辅助激光足印定位^[18]。

2 激光测高数据极地区域精度验证

高程精度是开展后续研究的基本保障,由于南极地理环境十分特殊,并且现有国产激光数据足印间距较大,难以使用高精度的实测GNSS数据进行大范围的激光测高数据精度验证工作,因此借助REMA(Reference Elevation Model of Antarctica)数据开展高程精度评估。REMA是由美国明尼苏达大学

表1 国产卫星激光测高载荷介绍

Table 1 Introduction to laser altimeter payload of Chinese satellites

	资源三号 02星	资源三号 03星	高分七 号	陆碳监测 卫星
发射日期	2016年	2020年	2019年	2022年
探测体制	阈值探测	阈值探测	全波形	全波形
激光波束	1	1	2	5
激光重复频率	2 Hz	2 Hz	3 Hz	40 Hz
激光器工作波长	1 064 nm	1 064 nm	1 064 nm	1 064 nm
激光脉冲宽度	~7 ns	~5 ns	5~7 ns	3~7 ns
单脉冲激光能量	200 mJ	150 mJ	180 mJ	70 mJ
激光发射和回波采样频率	\	\	2 GHz	1.2 GHz
激光发射和回波量化位数	\	\	10 bit	12 bit
光斑直径	75 m	45 m	~21 m	25 m
足印相机地面像元分辨率	\	\	3.2 m	8 m
测距精度	≤1 m	≤0.3 m	≤0.3 m	≤0.3 m

和俄亥俄州立大学基于WorldView-1/2/3和少量的GeoEye-1高分分辨率光学影像,以立体摄影测量方法构建发布的2 m/8 m分辨率的南极表面高程产品,高程精度优于1 m,已被广泛用于各类极地研究^[19]。本文收集了现有国产资源三号03星、高分七号卫星和陆碳监测卫星采集的南极冰盖表面高程数据,通过计算与REMA数据的高程差值,使用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和平均误差(Mean Error, ME)评价数据高程精度,验证前首先对数据进行筛选,剔除受外部环境影响导致的异常高程值。

2.1 有效数据筛选方法

参考已有研究,首先确保数据的大气、潮汐、精密轨道和姿态等参数的有效性,资源三号03星数据

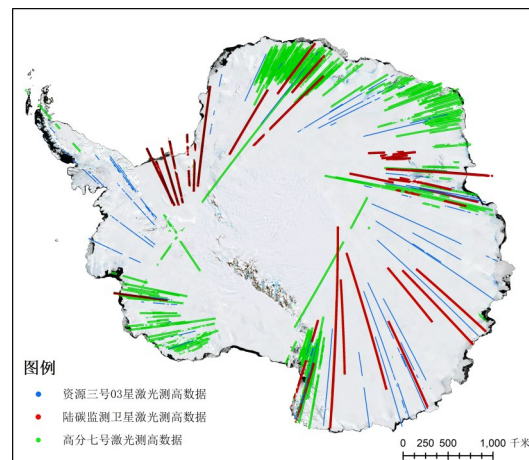


图1 国产激光测高数据南极分布

Fig. 1 Distribution of Chinese satellite laser altimetry data in Antarctica

可通过多阈值计算脉宽^[14],高分七号和陆碳监测卫星可使用回波信息计算相关参数,设定各质量参赛阈值进行筛选以保留精度更高的数据,对于极地区域重点关注云遮挡及饱和现象对激光测高数据高程精度的影响。

极地区域云覆盖严重,南极的云量在全年大致是恒定在50%~60%左右,云量在南极大陆的中心处最小,向海岸移动不断增大,海岸处呈现出最大值。激光脉冲穿过云雾等粒子覆盖的区域时会发生大气散射效应,会导致激光能量衰减使测量高程远低于目标真实值,可能引起数十厘米甚至米级的最终测高偏差,仅使用激光测高数据判断传输路径是否存在云影响的效果较差,因此以高分七号及陆碳监测卫星的激光测高载荷的足印影像作为参考,使用影像云检测方法判断激光足印位置是否存在云遮挡。

极地区域常年冰雪覆盖,高反射率的冰雪表面会引起回波波形过饱和,波形饱和会造成波形失真,失真的波形数据会影响到计算高程值。高分七号和陆碳监测卫星的激光数据均采用高低增益模式,虽然低增益模式可有效避免接收回波饱和,但仍存在部分数据饱和。高分七号数据的量化范围为0~1 023,当波形数据钟存在连续三个采样点值为1 023时,认为该接收回波为饱和波形;陆碳监测数据的量化范围为0~4 095,当波形数据钟存在连续三个采样点值为4 095时,认为该接收回波为饱和波形,此类饱和波形数据均视为无效数据。

2.2 精度验证结果

高分七号数据采集时间为2020年8月至2025年2月,共采集了70 450个激光测高数据,经筛选后保留35 264个有效数据,约占其数据总量的50.05%;资源三号03星数据采集时间为2020年11月至2024年8月,共采集了7 721个激光测高数据,经筛选后保留6 115个有效数据,约占其数据总量的79.19%;陆碳监测卫星数据采集时间为2023年2月至2023年3月,共采集了855 098个激光测高数据,经筛选后保留182 604个有效数据,约占其数据总量的21.35%。激光测高数据受环境影响较大,由于三类数据采集时间和地理位置均不相同,地面坡度、云雾遮挡等外部环境影响是造成有效数据占比差异的主要原因。

为尽量避免时间差异引起的验证偏差,验证时参考南极海岸边界数据,仅保留在南极大陆上的激

光点进行精度评价,位于冰架的激光数据被删除。在南极大陆区域,其表面高程变化较小,因此其评价结果具有一定参考性,冰架区域因其受海洋、潮汐及自身重力等影响,属于明显变化区域,此区域内数据的精度验证结果意义不大。图2~3和图4分别为三类激光测高数据精度验证误差分布图,图中横坐标为高程误差,纵坐标为频数,表2展示了筛选前后激光数据的精度变化。由评价结果可知,高分七号激光数据的精度最高,约为0.86 m;资源三号03星数据精度与高分七号基本一致,约为0.88 m;陆碳监测卫星精度最低,约为1.22 m。同时获取了ICESat-2数据在2023年2月采集的数据,同样使用REMA进行精度评价,其精度约为0.44 m。

表2 极地区域精度验证结果

	筛选前			筛选后		
	ME/m	RMSE/m	数据量	ME/m	RMSE/m	数据量
资源三号03星	-0.09	1.01	7 721	-0.08	0.88	6 115
高分七号卫星	-0.34	4.01	70 450	-0.04	0.86	35 264
陆碳监测卫星	-0.12	3.87	855 098	-0.19	1.22	182 604
ICESat-2				-0.02	0.44	628 187 644

对验证结果进一步分析时发现,激光测高系统不同波束间存在明显差异。如图2所示,高分七号的波束1和波束2数据虽然数据整体高程误差基本一致,波束1约为0.85 m,波束2约为0.87 m,但出现了明显的系统性高程误差,波束1的平均误差约为0.29 m,波束2的平均误差约为-0.40 m;陆碳监测卫星的五波束数据中第三波束数据平均误差为0.09 m,其余波束平均误差均为负值,且RMSE明显低于第三波束,不同波束的高程误差统计如表3所示。表3展示了高分七号卫星与陆碳监测卫星的不同波束间的高程精度差异,包括平均误差、RMSE和参与统计的数据量。

国产激光测高数据在南极区域的高程精度明显低于在国内或其他低纬度区域如美国等区域的已有验证结果。可能的原因是现有国产卫星检校工作多在我国内蒙古、江苏等区域展开,依靠检校结果确定卫星检校系数,南极区域纬度高,且与我

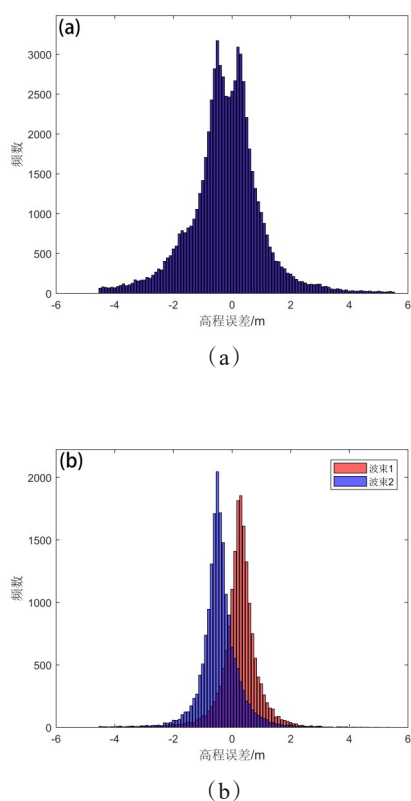


图2 高分七号激光测高数据筛选前后精度验证结果:(a)原始数据;(b)筛选后数据

Fig. 2 Accuracy validation results of GF-7 laser altimetry data before and after screening: (a) raw data; (b) filtered data

国地理距离非常远,现有的检校参数虽然很好地满足了国内或同纬度区域的精度需求,但对于南极、北极等极地区域可能还并不完全适用。资源三号03星的激光足印直径约45 m,整体足印面积约为高分七号卫星的4.6倍、陆碳监测卫星的3.3倍,较大的足印面积、阈值探测模式和南极平坦地形导致其高程精度对于卫星姿态、卫星轨迹影响不敏感,具体到其精度可达到与高分七号卫星大致相同,但同时也表明高分七号卫星激光测高系统在地表高程测量方面更为敏感,可以获取更为精细的极地地表信息。

现有的试验精度验证工作采用REMA数据作为参考,REMA数据本身存在约1 m的高程误差,所以实际上国产卫星激光测高数据在南极区域的高程精度应该更优于现有验证结果,完全可以应用于极地高精度三维地构建、长时间跨度冰盖表面高程变化监测和物质平衡研究,但验证结果同时表明国产卫星激光测高数据在极地区域的数据处理仍有

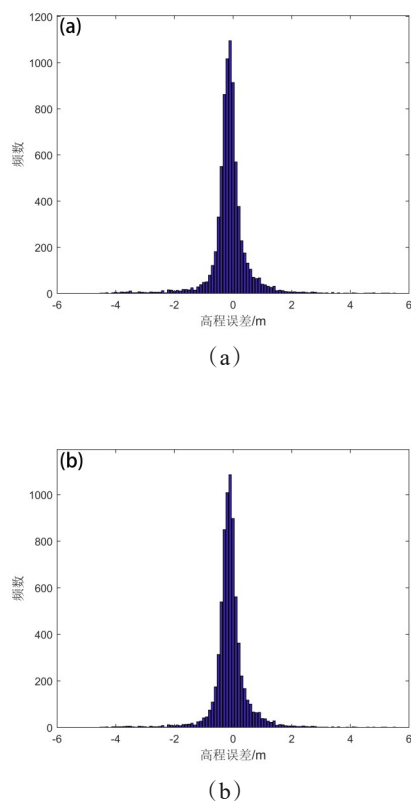


图3 资源三号03星激光测高数据筛选前后精度验证结果:(a)原始数据;(b)筛选后数据

Fig. 3 Accuracy validation results of ZY-3 03 laser altimetry data before and after screening: (a) raw data; (b) filtered data

较大的优化空间,如何降低其系统性偏差,提高整体精度和可靠性是未来研究的重点。

3 极地高精度三维地形构建

3.1 三维地形构建方法

以卫星立体影像数据构建数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)产品一般需要外业实测点作为控制点,但在极地区域大规模采集外业控制点基本不可行,作为外业控制点的有效替代,激光测高数据已被广泛应用于提高各类地形产品的高程精度。

高分七号卫星可同时获取立体光学影像和激光测高数据,极大程度降低了因立体光学影像与激光测高数据不同源造成的地理定位误差。本文采用高分七号卫星在2021年11月采集的南极部分区域立体影像数据,影像整体纹理清晰,无云雾、过曝现象,以同轨激光测高数据作为控制数据,辅助立体影像区域网平差,优化立体影像定向参数,提升

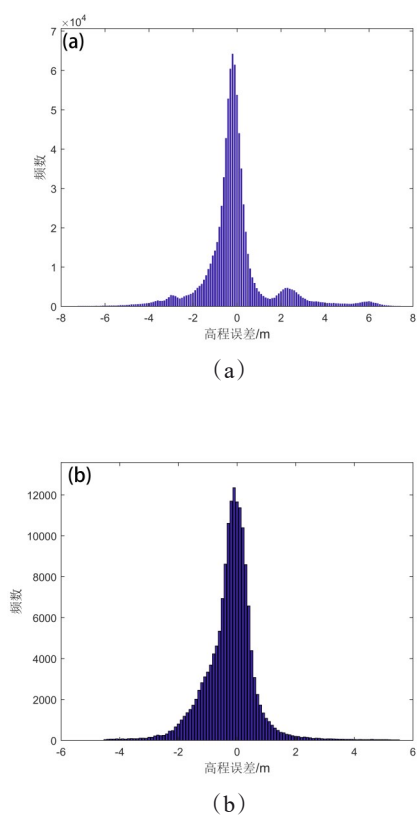


图4 陆碳监测卫星激光测高数据筛选前后精度验证结果：
(a)原始数据;(b)筛选后数据
Fig. 4 Accuracy validation results of TECIS laser altimetry data before and after screening: (a) raw data; (b) filtered data

表3 不同波束精度验证结果

Table 3 Accuracy verification results in polar regions				
	波束	ME/m	RMSE/m	数据量
高分七号	波束1	-0.29	0.85	17 280
	波束2	0.40	0.89	17 984
陆碳监测卫星	波束1	-0.28	1.51	14 205
	波束2	-0.15	1.38	39 852
	波束3	0.09	1.12	51 434
	波束4	-0.31	1.39	43 719
	波束5	-0.42	1.40	33 495

其立体测图精度,再经影像密集匹配提取高精度的DEM。激光测高数据采用前述方法进行筛选,保留质量较好的作为高程控制点。

激光点在足印影像上的像点坐标已知,因此可通过足印影像和立体影像间的高精度配准,进而获取激光点在光学影像上的精确像点坐标,实现基于激光测高数据的高程控制:

1)区域自由网平差。使用高分七号双线阵立

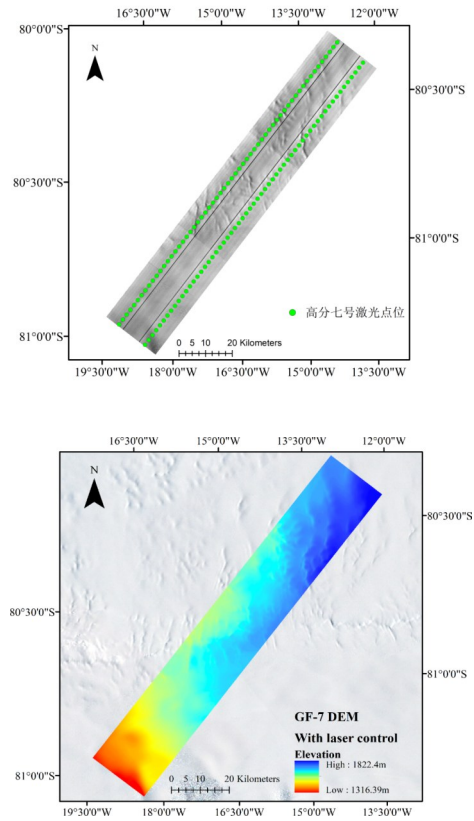


图5 南极区域GF-7卫星立体影像及激光测高数据
Fig. 5 GF-7 satellite stereo images and laser altimetry in the Antarctic

体影像构建初始区域网,采用特征点匹配算法获取数量、分布满足要求的连接点集。利用光束法平差技术实施自由网平差,完成区域网影像的高精度相对定向,为后续联合平差提供几何基准。

2)确定激光点在立体影像上的像点坐标。激光点具有精确的经纬度坐标和其在足印影像上的像点坐标,首先使用激光点经纬度坐标获取激光测高点在影像上的粗略像点坐标,再在粗略像点周围的小范围内,对足印影像与立体影像进行最小二乘匹配,通过最小二乘匹配方法可以达到亚像素级的匹配精度,计算激光点的准确像点坐标,进而获取两种影像的像点坐标转换方程。由于足印影像的分辨率与立体影像不同,在匹配时需要将立体影像重采样至3.2 m,以保证匹配效果。在获取像点坐标转换方程后,由已知的激光点在足印影像上的像点坐标计算出激光测高点在立体影像上的像点坐标。

3)激光测高点与立体影像联合平差。根据激光测高点的三维信息、激光测高点在立体影像上的

像点坐标,构建包含激光点三维坐标与影像匹配坐标的联合平差模型,通过计算平面与高程残差进行质量控制。设定阈值筛选有效控制点后,采用迭代优化方法更新立体影像几何模型。在确保所有残差符合精度要求后,获取精度优化后的立体影像,并基于此生产高精度数字高程模型。

3.2 极地地形产品精度验证

获取了区域内 63451 个时相相差在一个月内的 ICESat-2/ATL06 激光点作为精度验证数据,ICESat-2/ATL06 为 ICESat-2 陆地冰高程产品,其冰盖高程精度可达到 $0.1\text{ m}^{[20-21]}$ 。分别验证了无控 GF-7 DEM 与激光测高作高程控制点的 GF-7 DEM 的高程精度,结果如图 6 所示,图 6(a)为立体影像无控平差的精度验证结果,图 6(b)为激光测高程控制点辅助立体影像平差的精度验证结果。仅使用立体影像建立的区域 DEM 有明显的系统误差,平均误差约为 24.5 m ,RMSE 约为 24.96 m ;以激光测高数据作为高程控制,建立的区域 DEM 平均误差约为 0.55 m ,RMSE 约为 0.94 m ,激光数据辅助下 DEM 产品整体精度有明显提升。表 4 为国家测绘行业标准中 1:10 000 数字高程模型高程中误差要求,该地形产品满足标准中平地区域高程中误差不超过 1 m (三级)的精度要求^[22]。

4 多源激光数据南极高程变化监测

由于南极区域冰面高程相对稳定,即在年尺度变化上不明显,因此采用 2004—2008 年的 ICESat 数据与 2023 年的陆碳监测卫星数据,计算十几年尺度上的交叉点高程差值,以更为清晰地表现实验区冰盖表面高程变化。

4.1 交叉点提取及高程变化计算

传统的激光交叉点计算南极冰盖高程变化使用的是同一激光测高载荷采集的升轨和降轨数据,本研究使用 ICESat/GLAS 和陆碳监测卫星(Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite, TECIS)的多波束激光雷达两种不同激光器数据。在求取交叉点高程变化量时,需保证在交叉点两侧均有数量足够且连续的 ICESat 激光点和陆碳监测卫星激光点,采用沿轨内插的方式获取两类数据在交叉点位置的高程值,进而计算高程变化量,具体方法如下:

(1) 高程系统统一。ICESat 数据采用 Topex/Poseidon 椭球体,陆碳监测卫星采用 WGS84 椭球体,两类参考椭球的水平位移较小,可以忽略,垂直偏差可以采用常数进行整体校正,即 WGS84 椭球体

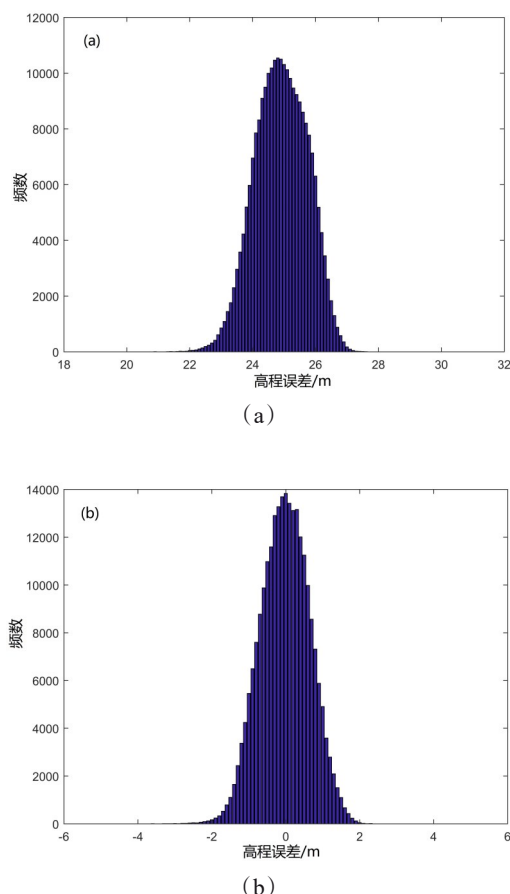


图 6 南极区域 GF-7 DEM 精度验证结果:(a)无控 GF-7 DEM 精度验证结果;(b)激光测高作高程控制点 GF-7 DEM 精度验证结果

Fig. 6 Verification results of GF-7 DEM accuracy in the Antarctic: (a) laser altimetry for elevation control point GF-7 DEM accuracy verification results; (b) uncontrolled GF-7 DEM accuracy verification results

表 4 1:10 000 数字高程模型高程精度要求

Table 4 Requirements for elevation accuracy of 1:10 000 digital elevation model

比例尺	地形分类	高程中误差/m		
		一级	二级	三级
1:10 000	平地	0.5	0.7	1.0
	丘陵	1.2	1.7	2.5
	山地	2.5	3.3	5.0
	高山地	4.0	6.0	8.0

高程约为 Topex/Poseidon 椭球体减去 0.7 m ,如公式(1)所示,式中 $\text{ICESat}_{\text{WGS84}}$ 为转换后的 ICESat 数据 WGS84 高程值,ICESat_{Topex} 为原始 ICESat 高程值。

$$\text{ICESat}_{\text{WGS84}} = \text{ICESat}_{\text{Topex}} - 0.7 \quad (1)$$

(2) 分别对 ICESat 和 TECIS 数据进行线性拟

合。以 TECIS 数据范围对 GLAS 数据进行筛选,选择同一范围内的 ICESat 数据。由于试验区面积较小,所以仅采用三次多项式进行初步拟合。

(3) 交叉点坐标计算。使用 ICESat 和 TECIS 数据轨迹拟合的曲线,计算粗略的交叉点坐标,地表实际交叉点和粗略交叉点间具有一定偏差,因此计算各激光点与粗略交叉点的距离,选择与此交叉点距离最近的激光点位,以此激光点为中心,沿轨前后各选择 2 个激光点,共 5 个激光点位进行直线拟合。计算 ICESat 和 TECIS 拟合直线的交点坐标作为交叉点的精确坐标。图 7 为方法示意图,左侧部分为陆碳监测卫星数据与 ICESat 数据在试验区的分布,右侧为交叉点确定方法示意图,图中紫色线段为三次多项式拟合曲线,通过曲线相交计算粗略交叉点位置;红色虚线为小范围内的拟合直线,通过红色虚线相交确定实际交叉点位置。

(4) 通过插值计算 ICESat 和 TECIS 激光数据在交叉点坐标处的高程值。在进行插值时为保证插值精度,需要满足参与插值的 ICESat 和陆碳监测数据均为连续有效值;交叉点位于参与插值的激光数据中间,即交叉点在沿轨方向前后均有有效数据。

(5) 使用 ICESat 激光点和 TECIS 激光点计算出的交叉点高程,计算两类数据在交叉点位置的高程差值,结合两类数据的获取时间计算一定时间内的高程变化率。交叉点高程变化率计算公式为:

$$dh = h_{ICESat} - h_{TECIS} \quad (2)$$

$$dh/dt = \frac{dh}{t_{ICESat} - t_{TECIS}} \quad (3)$$

h_{ICESat} 是 ICESat 数据在交叉点位置内插高程值, h_{TECIS} 是陆碳监测卫星数据在交叉点位置内插高程值, dh 表示交叉点处两类数据的高程差值, dt 是两类数据的时间跨度(单位:年), dh/dt 表示为最终的高程变化率(单位:米/年)。

4.2 基于交叉点的区域变化监测结果

选择 2023 年 2—3 月份采集的陆碳监测卫星激光数据和 2004 年、2005 年、2006 年、2008 年 2—3 月份采集的同区域的 ICESat 数据,使用上述交叉点方法开展南极区域冰盖高程变化监测。表面高程变化监测结果不确定性由陆碳监测卫星和 ICESat 卫星测高精度决定,陆碳监测卫星精度采用前文验证结果,ICESat 精度设定为 0.15 m,按公式(4)计算得到其高程误差不确定性为 1.17 m;变化速率结果如公式(5)所示, v 为年均变化速率, α 为显著水平,由于本研究数据总量较小,因此置信度设为 90%,对

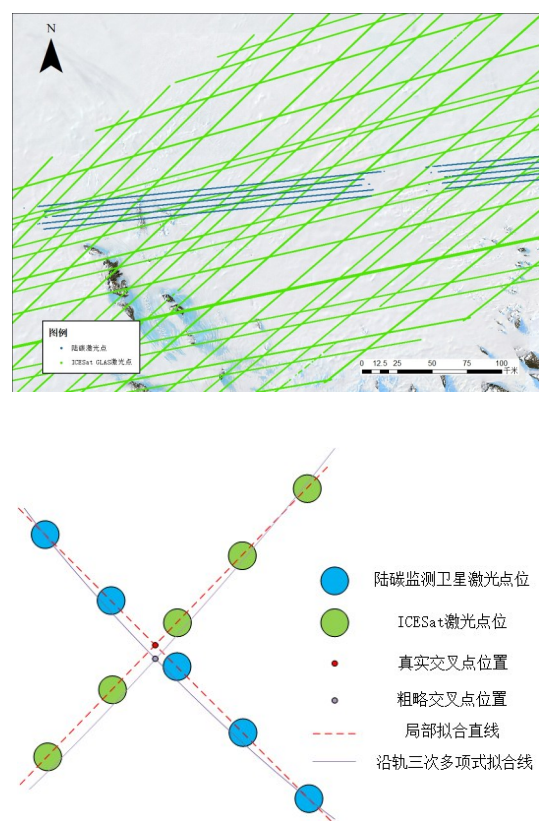


图 7 陆碳监测卫星与 ICESat 交叉点示意

Fig. 7 Crossover points of TECIS and ICESat/GLAS

应的 α 为 0.1, Z 为置信区间对应分位数,可通过查表得到此处为 1.645, σ 为样本标准差, n 为样本总量。

$$\sigma_{dh} = \sqrt{\sigma_{ICESat}^2 + \sigma_{TECIS}^2} \quad (4)$$

$$v = \overline{dh/dt} \pm Z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

基于交叉点方法并结合 2023 年 2—3 月陆碳监测卫星激光数据与 2004—2008 年同期 ICESat 数据,分析了南极试验区的冰盖高程变化特征,表 5 为基于交叉点的极地区域冰盖高程变化量统计结果,计算了不同年份所有交叉点的最大累积值、最大消融值、平均变化值和平均变化速率。图 8 为不同年份中,交叉点高程变化量分布示意图,展示了不同高程变化量范围内的交叉点个数。表 5 和图 8 显示该试验区处于微弱的消融状态,虽然部分交叉点位有一定累积,但大多数交叉点发生明显消融,即高程差值为负。受限于数据覆盖不足,陆碳监测卫星仅两轨数据,导致交叉点数量较少,难以准确表达区域表面高程变化的实际情况,后续通过调整观测模式,扩大陆碳监测卫星在南极区域的覆盖范围,进

表 5 基于交叉点的极地区域冰盖高程变化量统计

Table 5 Statistics of Antarctic surface elevation changes based on crossover points

年份	交叉点数量	最大累积值/m	最大消融值/m	平均值/m	变化速率/m·a ⁻¹
2004	62	0.824	-2.092	-0.659±1.17	-0.034±0.006
2005	47	1.007	-2.299	-0.603±1.17	-0.036±0.009
2006	41	1.419	-2.205	-0.712±1.17	-0.042±0.011
2008	42	0.765	-2.118	-0.821±1.17	-0.055±0.012

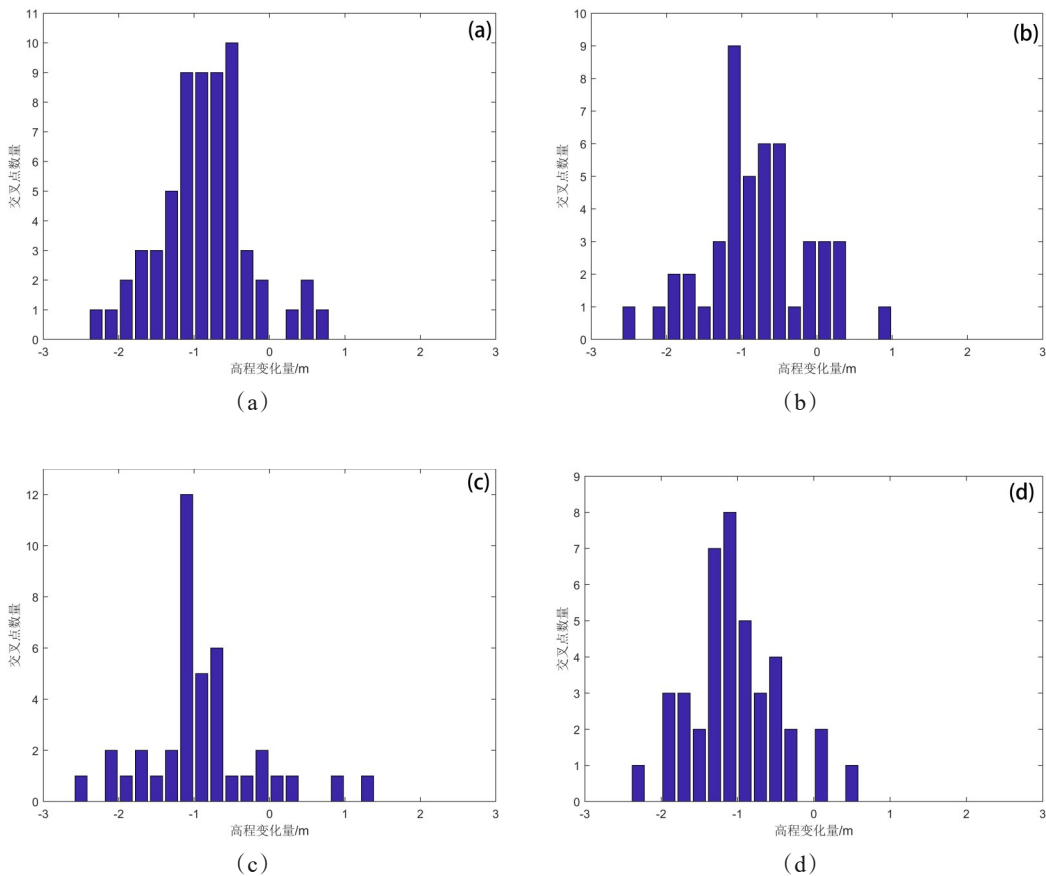


图 8 试验区表面高程变化量:(a)2004—2024 年表面高程变化量;(b)2005—2024 年表面高程变化量;(c)2006—2024 年表面高程变化量;(d)2008—2024 年表面高程变化量

Fig. 8 Surface elevation changes in the experimental area: (a) surface elevation changes from 2004 to 2024; (b) surface elevation changes from 2005 to 2024; (c) surface elevation changes from 2006 to 2024; (d) surface elevation change from 2008 to 2024

而显著提升交叉点数量与空间分布密度,为长期趋势分析提供更坚实的数据基础;现有陆碳监测卫星数据精度稍低,在冰架、冰流等变化剧烈区域可获得更为可信的高程变化量,后续经过数据再处理等手段提升精度后,有望支撑全南极范围内开展表面高程变化监测。

5 结论

本文基于现有国产卫星激光测高数据开展极地应用实践,从激光测高数据精度验证、辅助立体

影像构建极地区域三维地形和极地表面高程变化监测三个方面验证了国产激光测高数据在极地区域的应用潜力。试验结果表明,国产卫星激光测高数据在极地区域精度良好,以 REMA 作为验证数据,高分七号、资源三号 03 星和陆碳监测卫星激光测高数据高程精度分别为 0.86 m、0.88 m 和 1.22 m,高分七号与陆碳监测卫星不同波束间存在精度差异,与 REMA 相比具有明显的系统性误差,后续需深入优化极地区域激光测高数据处理;以高分七号卫星激光测高数据作为高程控制,可明显提升极

地区域三维地形的高程精度,实验区域高程精度由 24.96 m 提升至 0.94 m,满足 1:10 000 数字高程模型高程精度要求;使用陆碳监测卫星与 ICESat 激光测高数据计算了极地表面高程变化,尽管受限于数据覆盖密度和精度,现有变化监测结果局限性较大,但研究初步证明了国产激光测高数据在极地表面高程变化监测的可行性。

国产激光测高卫星有望成为我国极地研究的核心数据源,未来需加快专用极地激光测高卫星研发,包括推进新一代光子体制测高卫星研制、增加激光波束数量和提高重频率等,通过技术创新与应用深化,构建天地一体化极地观测体系,为全球气候变化研究和极地治理提供中国方案。

References

- [1] Smith B, Fricker H A, Gardner A S, et al. Pervasive ice sheet mass loss reflects competing ocean and atmosphere processes [J]. *Science*, 2020, 368 (Jun. 12 TN. 6496): 1239-1242.
- [2] Shepherd A, Ivins E, Rignot E, et al. Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017 [J]. *Nature*, 2018, 558: 219-222.
- [3] Li R X, Xia M L, Xie H, et al. Advances in satellite remote sensing monitoring of Antarctic Ice Sheet mass changes [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2023, 66(8): 3115-3143.
李荣兴,夏梦莲,谢欢,等.南极冰盖物质平衡变化的卫星遥感监测现状与发展趋势[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(8): 3115-3143.
- [4] Dongchen E, Wang Z M, Zhang S K. Progress in Chinese Antarctic geodetic remote sensing [J]. *Advances in Polar Science*, 2018, 2: 78-86.
- [5] ZHANG S Q, CHEN P, ZHANG Z H, et al. Arctic sea surface CO₂ partial pressure based on LiDAR [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2024, 43(3): 399-407.
张思琪,陈鹏,张镇华,等.基于激光数据的北极海水二氧化碳分压研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2024, 43(3): 399-407.
- [6] Zhiyu Z, Xu N, Ma Y, et al. Land and snow-covered area classification method based on the background noise for satellite photon-counting laser altimeters [J]. *Optics Express*, 2020, 28: 16030-16044.
- [7] Luo S Z, Wang C, Xi X H, et al. Forest leaf area index estimation using combined ICESat/GLAS and optical remote sensing image [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2015, 34(2): 243-249.
骆社周,王成,习晓环,等.星载激光雷达 GLAS 与 TM 光学遥感联合反演森林叶面积指数[J]. *红外与毫米波学报*, 2015, 34(2): 243-249.
- [8] Abshire J B, Sun X, Riris H, et al. Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat Mission: On-orbit measurement performance [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): L21S02.
- [9] Markus T, Neumann T, Martino A, et al. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 260-273.
- [10] Neumann T, Martino A, Markus T, et al. The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 mission: A global geolocated photon product derived from the Advanced Topographic Laser Altimeter System [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 16.
- [11] Li G Y, Tang X M. Analysis and validation of ZY-3 02 Satellite laser altimetry data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(12): 1939-1949.
李国元,唐新明.资源三号 02 星激光测高精度分析与验证[J]. *测绘学报*, 2017, 46(12): 1939-1949.
- [12] Guo J Q, Li G Y, Zuo Z Q, et al. Full waveform data quality and characteristic analysis of GF-7 satellite laser altimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020 (S02): 137-146.
郭金权,李国元,左志强,等.高分七号卫星激光测高仪全波形数据质量及特征分析[J]. *红外与激光工程*, 2020 (S02): 137-146.
- [13] Chen J Y, Tang X M, Li G Y, et al. Terrain height assessment of satellite laser altimetry standard products for natural resources [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2024, 28(3): 704-716.
陈继溢,唐新明,李国元,等.自然资源陆地卫星激光测高标准产品高程精度评价[J]. *遥感学报*, 2024, 28(3): 704-716.
- [14] Li G Y, Tang X M, Zhou Ping, et al. Laser altimetry data processing and combined surveying application of ZY3-03 satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(5): 441-449.
李国元,唐新明,周平,等.资源三号 03 星激光测高数据处理与复合测绘应用[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(5): 441-449.
- [15] Tang X M, Chen J Y, Li G Y, et al. Error analysis and preliminary pointing angle calibration of laser altimeter on Ziyuan-3 02 Satellite [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(11): 1611-1619.
唐新明,陈继溢,李国元,等.资源三号 02 星激光测高误差分析与指向角粗标定[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2018, 43(11): 1611-1619.
- [16] Li G Y, Tang X M, Chen J Y, et al. Processing and preliminary accuracy validation of the GF-7 satellite laser altimetry data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(10): 1338-1348.
李国元,唐新明,陈继溢,等.高分七号卫星激光测高数据处理与精度初步验证[J]. *测绘学报*, 2021, 50(10): 1338-1348.
- [17] Zhang X W, Huang J, He T. et al. Overall Design of Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2022, 43(6): 16-26.
张新伟,黄缙,贺涛,等.陆地生态系统碳监测卫星总体设计[J]. *航天返回与遥感*, 2022, 43(6): 16-26.
- [18] Li G Y, Guo J Q, Chen J. et al. Terrestrial ecosystem carbon monitoring satellite laser elevation control point extraction and accuracy verification [J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(06): 295-305.
李国元,郭金权,陈杰,等.陆地生态系统碳监测卫星激光高程控制点提取与精度验证[J]. *光学学报*, 2025, 45

- (06): 295–305.
- [19] Howat I M, Porter C, Smith B E, et al. The reference elevation model of Antarctica [J]. *The Cryosphere*, 2019, 13 (2): 665–674.
- [20] Smith B, Fricker H A, Holschuh N, et al. Land ice height-retrieval algorithm for NASA’s ICESat-2 photon-counting laser altimeter [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111352.
- [21] Brunt K M, Neumann T A, Smith B E. Assessment of ICESat-2 ice sheet surface heights, based on comparisons over the interior of the Antarctic ice sheet[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(22): 13072–13078.
- [22] Digital products of fundamental geographic information. 1: 5 000 1:10 000 1:25 000 1:50 000 1:100 000 digital elevation models: CH/T 9009.2–2010[S], 2010.
基础地理信息数字成果. 1:5 000 1:10 000 1:25 000 1:50 000 1:100 000 数字高程模型: CH/T 9009.2–2010 [S], 2010.