

联合 CryoSat-2 测高数据和地面高程数据建立 东南极拉斯曼丘陵地区 DEM

肖 峰^{1,2} 李 斐^{1,2} 张胜凯^{1,2} 袁乐先^{1,2} 朱婷婷³

1 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079
2 极地测绘科学国家测绘地理信息局重点实验室,湖北 武汉,430079
3 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

摘 要:拉斯曼丘陵地区位于东南极伊丽莎白公主地,中国南极中山站位于拉斯曼丘陵的东部,是中国南极科学考察的重要地区。数字高程模型(DEM)是南极冰盖变化研究的基础,卫星测高数据是南极地区构建 DEM 的主要数据来源。CryoSat-2 是新一代用于极地冰盖和海冰监测的测高卫星,联合 2013 年和 2014 年南极冬季的 CryoSat-2 测高数据以及中国、澳大利亚、印度三个国家现场测量的 60 余个地面高程数据,利用克里金插值方法建立了拉斯曼丘陵地区 200 m 分辨率的 DEM(简称 LA-DEM)。利用未参与插值的地面高程数据对新建立的 LA-DEM 进行了验证,并与 Bamber 1km DEM、ICESat DEM、RAMPv2 DEM 以及 BEDMAP 2 等四种国际上常用的南极 DEM 进行比较,结果表明 LA-DEM 的高程精度约为 19.7 m,优于其他 4 种南极 DEM。

关键词:南极;拉斯曼丘陵;数字高程模型;CryoSat-2;GPS
中图法分类号:P228 **文献标志码:**A

拉斯曼丘陵地区(69°21′28″S~69°26′43″S, 75°58′19″E~76°26′20″E)位于东南极伊丽莎白公主地,北邻普里兹湾,南靠南极冰盖大陆,是进行南极海洋和大陆科学考察的理想区域。拉斯曼丘陵地区南北长约 9.76 km,东西长约 18.3 km,总面积约 177.6 km²,约有一半为海域,中间散布着数十个大小岛屿。1988~1989 年,中国进行首次东南极科学考察,在拉斯曼丘陵地区的协和半岛北部建立了中国第二个常年科学考察站——中山站。在此区域内,还有澳大利亚的劳基地、俄罗斯的进步站以及印度的巴拉提站等科学考察站。

拉斯曼丘陵地区地形破碎复杂、岛屿众多,加之气候多变,测量工作较为困难。1989 年,中国南极考察队以中山站为基地,建立了中山站测绘坐标系,并施测了中山站周围地区的大地控制点,此后又完成了整个拉斯曼丘陵地区大地测量控制网的布设和施测^[1];2002 年,澳大利亚南极考察队在拉斯曼丘陵地区进行了航空摄影测量^[2];

2008 年,印度南极考察队在拉斯曼丘陵地区进行了大比例尺测图,获得了等高距为 5 m 的等高线图^[3]。

在南极地区,数字高程模型(digital elevation model, DEM)是地球科学和环境科学研究的基础。近 30 年来,随着卫星测高技术的发展,世界各国的极地工作者建立了多个南极 DEM。1997 年,Bamber 等利用 ERS-1 测高数据建立了 5 km 分辨率的南极 DEM^[4](简称为 JLB97 DEM);1999 年,为处理 Radarsat 南极测图计划(RAMP) SAR 影像地面验证,美国伯德极地研究中心(BPRC)的 Liu 等利用地图数据、遥感数据及实测数据制作了一个全新的高精度、无缝南极 DEM^[5](简称为 RAMPv2 DEM);2007 年,美国国家雪冰数据中心(NSIDC)利用 ICESat 激光测高数据,制作了 500 m 分辨率的南极 DEM^[6](简称为 ICESat DEM);2009 年,Bamber 等结合 ERS-1 数据和 ICESat 数据建立了 1 km 分辨率的南极

DEM^[7] (简称为 Bamber 1km DEM); 2012 年, Shridhar 等联合 RAMPv2 DEM 数据、ICESat 数据以及印度南极考察队采集的 GPS 数据建立了拉斯曼丘陵地区 DEM, 高程精度约为 34.5 m^[8]; 2013 年, 英国南极局在 BEDMAP 1 的基础上推出了 BEDMAP 2, 包含冰盖表面高程、冰厚和冰下基岩高程 3 类栅格数据, 空间分辨率均为 1 km。BEDMAP 2 中冰盖表面高程数据来源主要包括 3 部分: 在内陆冰盖地区使用 Bamber 1 km DEM; 在地形较为复杂的山脉地区, 使用 RAMPv2 DEM; 冰架部分则使用 ICESat DEM^[9]。

目前已有的南极 DEM 因为水平分辨率较低, 在地形复杂的山区和沿海边缘地区高程精度较低而不能很好地满足应用需求^[10]。南极地区受其独特的地理位置和极端恶劣的气候环境限制, 不能进行大量的实地观测, 因此卫星测高数据是南极地区构建 DEM 的主要数据来源。2010 年 4 月, 欧空局成功发射 CryoSat-2 雷达测高卫星, 主要用于两极冰盖和海冰的监测^[11]。与传统的雷达测高卫星相比, CryoSat-2 卫星搭载了最新的合成孔径/干涉雷达高度计, 在冰盖边缘地区观测精度更高, 且数据覆盖范围得到显著提升, 达到 88°S/N。与 ICESat 激光测高卫星相比, CryoSat-2 雷达高度计不易受云层等因素的干扰, 数据空白较少。CryoSat-2 卫星轨道间距在 70°S/N 约为 2.5 km, 在 60°S/N 约为 4 km, 而 ICESat 卫星轨道间距在 70°S/N 约为 25 km, 在 60°S/N 达到 40 km, 因此在冰盖边缘区域, CryoSat-2 卫星能够提供更为密集的观测数据。

本文基于最新的 CryoSat-2 测高数据, 联合中国、澳大利亚、印度等国家的地面高程点数据, 研究建立拉斯曼丘陵地区的高精度 DEM。利用未参与插值的地面高程数据对新建立的 DEM 进行精度验证, 并与 RAMPv2 DEM、ICESat DEM、Bamber 1km DEM 以及 BEDMAP 2 等 4 种常用南极 DEM 进行比较分析。

1 数 据

1.1 CryoSat-2 数据

CryoSat-2 卫星沿近地轨道飞行, 轨道高度约为 717 km, 轨道周期为 369 d, 轨道倾角达到 92°。CryoSat-2 卫星搭载了最新的合成孔径/干涉雷达高度计 (synthetic aperture interferometric radar altimeter, SIRAL), 与传统的限制脉冲高度计相比, SIRAL 高度计采用了高重频脉冲, 在沿轨方

向能够连续采样, 从而提高沿轨方向的分辨率。SIRAL 高度计主要有 3 种观测模式运行, 其中 LRM (low resolution mode) 模式主要用于坡度较小的内陆冰盖地区; SAR (synthetic aperture) 模式主要用于海冰的测量; SARIn (synthetic aperture inerferometric) 模式主要用于坡度较大的冰盖边缘地区。

目前, CryoSat-2 卫星主要有 3 种级别的测高数据产品, 分别是 L1 层全码率数据 (full bit rate data)、L1b 层多视波形数据 (multi-looked waveform data) 以及 L2 层高程数据。L1 数据是按时间序列排列的原始观测数据, 同时附加了仪器改正、地球物理改正以及精密轨道数据, 主要用于合成孔径处理研究。L1b 数据由地面轨迹点的回波组成, 与 L1 数据相比, L1b 数据添加了 SARIn 模式的多视相位信息以及完整的仪器和地球物理改正信息。L2 数据主要包含高程和波形信息, 同时添加了剖面信息, 在 LRM 模式观测的冰盖高程数据中添加了从已知 DEM 获得的高度改正信息; 在 SAR 模式观测的海冰数据中添加了海冰厚度的估计值; 在 SARIn 模式观测的数据中添加了坡度改正信息。

在拉斯曼丘陵地区, CryoSat-2 卫星主要采用 SARIn 模式。在该区域内, CryoSat-2 卫星轨道间距约为 2 km, 沿轨采样间隔约为 300 m。通过与 ICESat 高程点对比发现, SARIn 数据在冰盖边缘地区的精度在 3 m 左右。本文采用的数据为 2013 和 2014 年南极冬季期间 (2013 年 7~9 月和 2014 年 7~9 月) 的 CryoSat-2 卫星 L2 数据产品, 高程基准为 WGS84 椭球。图 1 为拉斯曼丘陵地区 CryoSat-2 卫星地面轨迹。

1.2 地面高程数据

我国进行首次东南极考察时, 以中山站为基地, 进行了拉斯曼丘陵地区大地测量控制网的布设和施测, 此后又对控制网进行了改造, 分 3 期完成。传统的测量方法精度较低, 随着 GPS 技术的发展, 中国第 19、21 及 22 次南极考察队度夏期间, 利用 GPS 技术在拉斯曼丘陵地区对大地控制网进行了复测, 点位精度优于 ±0.2 m, 高程基准为 WGS-84 椭球。本文搜集了其中 25 个 GPS 高程数据 (见图 1 中黑色圆点)。

1991 年, 澳大利亚测量和土地信息部门利用 20 世纪 60 年代航空摄影影像以及 SPOT 卫星影像, 生成了拉斯曼丘陵地区比例尺为 1:25 000 的地形图。2002 年, 澳大利亚南极数据中心 (AADC) 基于上述地形图以及 Landsat7 卫星影

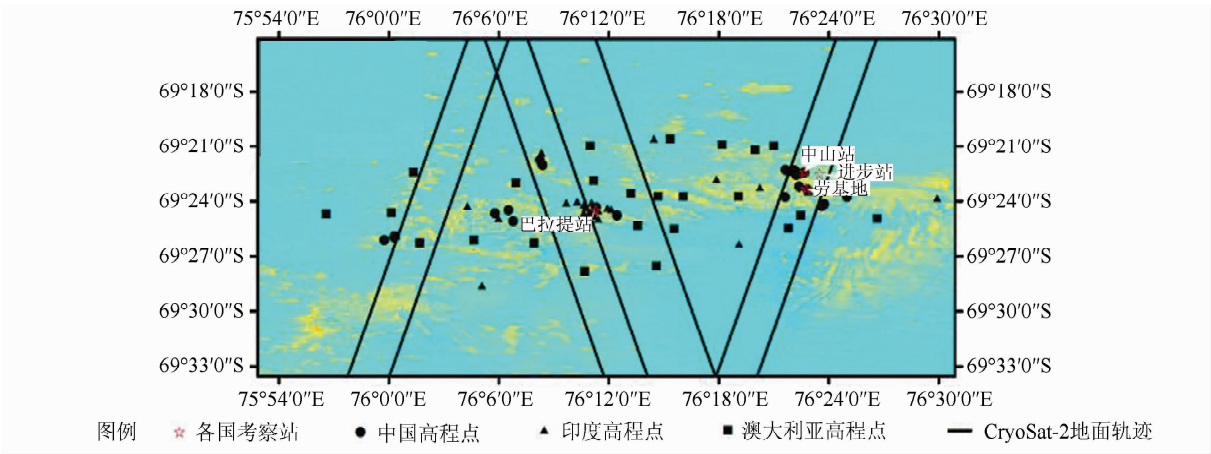


图 1 拉斯曼丘陵地区 CryoSat-2 卫星地面轨迹和高程点点位图,底图为 Landsat-7 影像

Fig. 1 Coverages of CryoSat-2 Tracksand Elevation Points in the Larsemann Hills,
The Map is Based on Landsat-7 images

像,执行了拉斯曼丘陵地区摄影测量计划,得到了一系列高精度地形数据。本文搜集了其中 26 个地面高程数据(见图 1 中黑色矩形),高程精度优于 1 m,高程基准为 WGS-84 椭球。

2008~2009 年,印度测绘局大地测量小组在拉斯曼丘陵地区进行了 GPS 观测,获得了 400 多

个高精度的高程点,高程精度优于 1 m,高程基准为 WGS84 椭球。本文搜集了其中 20 个 GPS 高程点(见图 1 中黑色三角形)。

本文共收集了上述 71 个来自中国、澳大利亚、印度 3 个国家的地面高程数据,用于 DEM 建立和精度验证,各高程点信息如表 1 所示。

表 1 中国、澳大利亚、印度 3 国地面高程数据统计

Tab.1 Ground-based Elevation Points from China, Australia, and India

中国高程数据			澳大利亚高程数据			印度高程数据		
经度/(°)	纬度/(°)	高程/m	经度/(°)	纬度/(°)	高程/m	经度/(°)	纬度/(°)	高程/m
76.005	−69.433	62	76.255	−69.343	10	76.241	−69.343	25
75.996	−69.435	101	76.303	−69.348	5	76.071	−69.404	5
76.096	−69.411	138	76.183	−69.349	5	76.337	−69.387	15
76.109	−69.408	134	76.350	−69.350	10	76.298	−69.380	100
76.370	−69.373	28	76.381	−69.391	80	76.318	−69.438	255
76.369	−69.372	42	76.318	−69.396	10	76.084	−69.477	105
76.378	−69.373	25	76.244	−69.396	5	76.498	−69.397	40
76.380	−69.389	80	76.002	−69.410	30	76.198	−69.406	30
76.373	−69.387	63	76.374	−69.413	110	76.138	−69.356	10
76.360	−69.396	95	76.363	−69.424	210	76.099	−69.415	85
76.364	−69.372	32	76.006	−69.431	5	76.186	−69.413	25
76.360	−69.371	40	76.132	−69.438	30	76.184	−69.401	25
76.373	−69.375	44	76.178	−69.463	190	76.171	−69.400	25
76.370	−69.376	68	76.243	−69.459	245	76.161	−69.401	25
76.137	−69.363	65	76.259	−69.425	125	76.190	−69.408	50
76.139	−69.367	74	75.943	−69.411	15	76.202	−69.407	50
76.416	−69.396	120	76.028	−69.438	45	76.190	−69.416	25
76.583	−69.347	74	76.022	−69.373	5	76.177	−69.410	25
76.586	−69.346	56	76.186	−69.381	30	76.177	−69.403	50
76.185	−69.411	118	76.226	−69.422	55	76.179	−69.405	50
76.188	−69.405	65	76.115	−69.383	35			
76.396	−69.403	149	76.267	−69.396	40			
76.393	−69.404	157	76.220	−69.393	20			
76.113	−69.418	94	76.333	−69.353	55			
76.207	−69.413	92	76.444	−69.416	110			
			76.077	−69.435	140			

2 DEM 建立

2.1 插值方法选取

插值方法是影响 DEM 精度的主要因素之一,常用的插值方法有反距离加权插值方法、克里金插值方法、径向基函数插值方法、局部多项式插值方法以及最近邻点插值方法等。其中克里金插值方法是对空间分布数据求线性最优、无偏内差估计的一种方法。与其他插值方法不同,克里金插值方法充分利用了数据空间场的性质,在插值过程中可以反映空间场的各向异性,并且充分利用采样点之间的空间相关性。在南极地区,克里金插值方法也有着很好地适应性^[12]。因此,本文选用普通克里金插值方法进行格网插值,变异函数模型选用线性模型。

2.2 DEM 建立

DEM 建立的具体过程如图 2 所示。

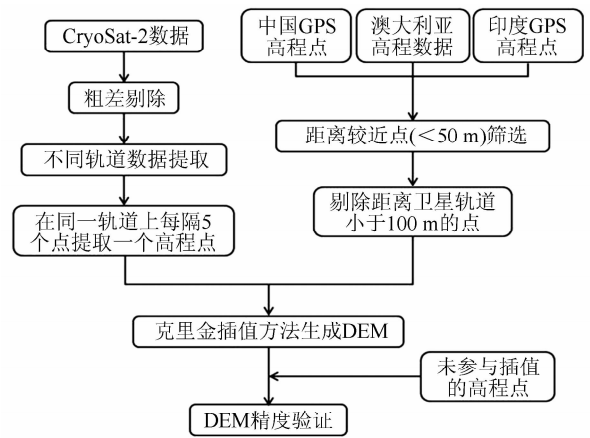


图 2 DEM 建立流程图

Fig. 2 Flow Chart of DEM Generation

1)为了保证数据的可靠性,需对 CryoSat-2 数据进行筛选,通过查看卫星轨道质量指标、姿态控制指标和背向反射系数等参数,对不合格数据进行剔除。在拉斯曼丘陵地区,CryoSat-2 卫星沿轨方向的高程点较为密集,而在相邻轨道之间则存在较大的数据空白。这种情况会导致在插值过程中出现方向性的异常分布。因此,插值前需对 CryoSat-2 数据进行抽稀处理。对于每条轨道上的 CryoSat-2 高程点,每隔 5 个高程点选择一个高程点参与插值,最终参与计算的 CryoSat-2 高程点为 4 830 个。

2)对地面高程点进行处理。对于两点间距离小于 50 m 的高程点,优先选用中国南极考察采集的 GPS 数据,其次选择印度南极考察队采集的

GPS 数据;对于距离 CryoSat-2 地面轨迹小于 100 m 的地面高程点进行剔除,最终,参与插值的地面高程点有 61 个。

3)利用普通克里金插值方法对 CryoSat-2 高程点和地面高程数据进行插值,生成了拉斯曼丘陵地区 DEM(LA-DEM),DEM 水平分辨率为 200 m,采用极方位投影,投影椭球和高程基准采用 WGS-84 椭球。图 3 为拉斯曼丘陵地区 DEM 三维曲面图。

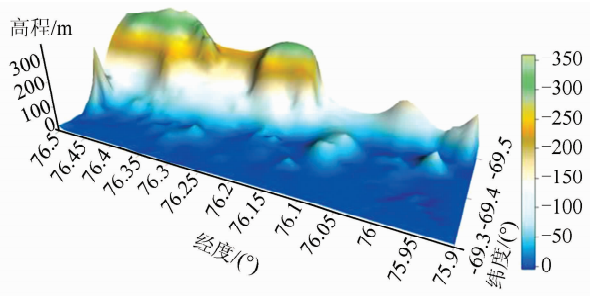


图 3 拉斯曼丘陵地区 DEM 三维曲面图

Fig. 3 DEM (3D-Surface) of a Region in the Larsemann Hills

3 DEM 精度验证与分析

由于拉斯曼丘陵地区地形破碎复杂,气候多变,测量资料较为稀少,本文利用未参与 DEM 生成的 10 个地面高程点对新建立的 LA-DEM 进行精度验证,并与 Bamber 1 km DEM、ICESat DEM、RAMPv2 DEM 以及 BEDMAP 2 等 4 种国际上常用的南极 DEM 进行比较,结果如表 2 所示。由于 CryoSat-2 测高数据和 3 种地面高程数据以及 4 种 DEM 数据采集于不同时期,存在一定的高程偏差。根据 ERS 系列卫星以及 ICESat 卫星的观测结果,在拉斯曼丘陵地区,冰盖高程变化值小于 0.1 m/a,因而可以认定由于时间间隔而导致的随机误差范围为 0.2~0.5m^[13]。与下文的计算结果比较可知,这种影响是微弱的,因此本文忽略此项误差。

图 4 为地面高程点与 5 种 DEM 高程差折线图。从图中可以看出,LA-DEM 与地面高程点的最大偏差为 40.234 m,大部分点高程误差在 20 m 内,平均高程误差约为 -1.255 m,高程精度约为 19.678 m;RAMPv2 DEM 的最大高程误差为 48 m,平均高程误差约为 14.3 m,高程精度约为 22.306 m;在该区域内 BEDMAP 2 中冰盖表面高程采用的 RAMPv2 DEM 的高程值,因此两者高程误差相近;Bamber 1 km DEM 和 ICESat

表 2 地面高程点与 5 种 DEM 高程差统计

Tab. 2 Statistics of the Comparison Between Ground-based Elevation Points and the Five DEMs

地面高程点			地面高程点与各 DEM 高程值差/m				
经度/(°)	纬度/(°)	高程/m	Bamber 1 km DEM	ICESat DEM	RAMPv2 DEM	BEDMAP 2	LA-DEM
76.005	-69.431	5	-33.012	-92	-23	-24	-31.711
76.381	-69.391	80	-53.699	21	25	24	12.522
76.179	-69.405	50	-5.472	12	33	34	-1.254
76.186	-69.413	25	-45.432	25	-3	-3	-7.094
76.19	-69.408	50	-20.432	12	24	23	-0.291
76.202	-69.407	50	-30.879	-33	29	28	10.205
76.177	-69.41	25	-45.432	32	11	1	-21.477
76.364	-69.372	32	-100.492	-41	15	14	-4.761
76.369	-69.373	27	-105.013	-45	10	11	-8.925
76.370	-69.376	68	-64.580	-5	48	49	40.234
平均值/m			-50.444	-11.400	14.300	15.764	-1.255
标准差/m			32.237	39.948	22.306	20.894	19.678

DEM 的最大高程误差超过 90 m,高程精度均超过 30 m。

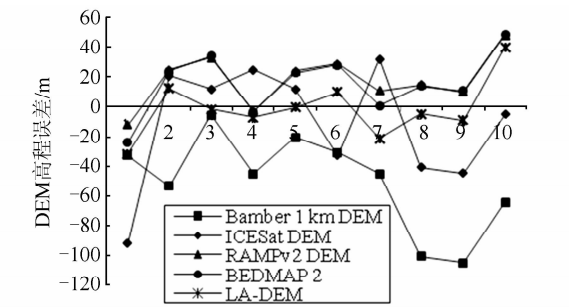


图 4 地面高程点与 5 种 DEM 高程差折线图
Fig. 4 Line Chart of Elevation Differences Between Ground-based Points and the Five DEMs

在拉斯曼丘陵地区,ICESat 卫星轨道间距约为 25 km,数据较为稀少,因而 Bamber 1 km DEM 和 ICESat DEM 精度可靠性较低。其中,Bamber 1km DEM 融合了 ERS-1 卫星测高数据和 ICESat 卫星测高数据,填补了 ICESat 卫星之间的轨道空白,精度略优于 ICESat DEM。在此区域内,RAMPv2 DEM 和 BEDMAP 2 主要采用了 ADD (Antarctic Digital Database)数据库数据、澳大利亚地图数据以及 GPS 实测数据,高程可靠性较高,在 4 种常用南极 DEM 中精度最高。在冰盖边缘地区,CryoSat-2 卫星采用 SARIn 模式,能够对回波信号相位差进行测量,精确测定回波反射的方向,从而实现对复杂地形的测量,且在 L2 产品中添加了相应的坡度改正信息,数据可靠性较高,因而 LA-DEM 精度优于其他 4 种全南极冰盖 DEM。

4 结 语

本文联合 2013 和 2014 年南极冬季期间的 CryoSat-2 测高数据以及中国、澳大利亚、印度 3

国的地面高程数据,采用克里金插值方法建立了拉斯曼丘陵地区 200 m 分辨率的 DEM。通过对沿轨高程数据的抽稀处理,有效地避免了插值过程中的方向性偏差。由于拉斯曼丘陵地区地形复杂,实地观测数据稀少,利用未参与插值的地面高程数据对新建立的 LA-DEM 进行验证,并与 Bamber 1km DEM、ICESat DEM、RAMPv2 DEM 以及 BEDMAP 2 等 4 种常用南极 DEM 进行比较。结果表明,LA-DEM 平均高程差为 -1.255 m,精度约为 19.678 m,优于其他 4 种南极 DEM。CryoSat-2 卫星采用了新型合成孔径雷达高度计,在拉斯曼丘陵地区采用 SARIn 模式,能够实现对复杂地形的精确测量。通过融合地面高程数据,DEM 精度得到进一步提升。

参 考 文 献

[1] Chen Chunming, E Dongchen, Sang Jizhang. Geodetic Network at Larsemann Hills, Antarctica[J]. *Antarctic Research*, 1995, 7(3): 95-100(陈春明, 鄂栋臣, 桑吉章. 南极拉斯曼丘陵地区大地测量控制网[J]. *南极研究*, 1995, 7(3): 95-100)

[2] Harris U. Larsemann Hills-Mapping from Aerial Photography Captured February 1998 [EB/OL]. Australian Antarctica Data Centre, <http://data.aad.gov.au/aadc/metadata>,2002

[3] Reddy C D, Dhar A. Magnetic Anomaly Map for Bharati Promontory, Larsemann Hills, East Antarctic [J]. *Current Science*, 2008, 94(12): 715-717

[4] Bamber J L, Bindshadler R A. An Improved Elevation Data Set for Climate and Ice-Sheet Modeling: Validation with Satellite Imagery[J]. *Ann Glacial*, 1997, 25: 430-444

[5] Liu H, Jezek K C, Li B. Development of an Antarctic Digital Elevation Model by Integrating Cartog-

raphic and Remotely Sensed Data: A Geographic Information System Based Approach [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(B10): 199-213

[6] DiMarzio J, Brenner A, Schutz R, et al. GLAS/ICESat 500 m Laser Altimetry Digital Elevation Model of Antarctica[R]. National Snow and Ice Data Center (Digital media), Boulder, Colorado, USA, 2007

[7] Bamber J L, Gomez-Dans J L, Griggs J A. A New 1 km Digital Elevation Model of the Antarctic Derived from Combined Satellite Radar and Laser Data-Part 1: Data and Methods[J]. *The Cryosphere*, 2009, 3: 101-111

[8] Jawak S D, Luis A J. Synergistic Use of Multitemporal RAMP, ICESat and GPS to Construct an Accurate DEM of the Larsemann Hills Region, Antarctica[J]. *Advances in Space Research*. 2012, 50 (4): 457-470

[9] Fretwell P, Pritchard H D, Vaughan D G, et al. Bedmap 2: Improved Ice Bed, Surface and Thickness Datasets for Antarctica[J]. *The Cryosphere*. 2013, 7(1): 375-393

[10] Xiao Feng, Zhang Shengkai, E Dongchen, et al. Precision Comparison and Analysis of the Four Antarctic Digital Elevation Models [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 640-648 (肖峰, 张胜凯, 鄂栋臣, 等. 四种南极数字高程模型的精度比较与分析[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(3): 640-648)

[11] Wingham D J, Francis C R, Baker S, et al. CryoSat: A Mission to Determine the Fluctuations in Earth's Land and Marine Ice Fields[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37(4): 841-871

[12] Zhang Shengkai, Xiao Feng, Li Fei, et al. DEM Development and Precision Analysis in Two Local Areas of Antarctica, Using Cryosat-2 Altimetry Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(11): 1 434-1 439 (张胜凯, 肖峰, 李斐, 等. 基于 CryoSat-2 测高数据的南极局部地区 DEM 的建立与精度评定[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2015, 40(11): 1 434-1 439)

[13] Bamber J, Gomez-Dans J L. The Accuracy of Digital Elevation Models of the Antarctic Continent [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237(3-4): 516-523

DEM Production for Larsemann Hills Combining Cryosat-2 and Ground-based Elevation Data

XIAO Feng^{1,2} LI Fei^{1,2} ZHANG Shengkai^{1,2} YUAN Lexian^{1,2} ZHU Tingting³

1 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Polar Surveying and Mapping, NASG, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Larsemann Hills, located on the Ingrid Christensen Coast of Princess Elizabeth Land in East Antarctica, is an ideal area for Antarctic ice sheet and oceanographic studies. Digital elevation models are of importance to many geoscientific and environmental studies in Antarctic and due to relatively poor coverage by ground based surveys, the main data source for developing Antarctic DEMs is satellite altimetry. The new operating satellite-borne altimeter for ice applications is the ESA satellite CryoSat-2, launched in April 2010. Based on CryoSat-2 data collected during austral winter of 2013 and 2014 and ground based elevation points from China, India, and Australia, a new 200 m DEM for the Larsemann Hills, termed LA-DEM, was derived by the Ordinary Kriging method. The accuracy of LA-DEM was assessed by residual elevation points. The results show that the accuracy of LA-DEM is about 19.7 m, and better than four commonly used Antarctic DEMs.

Key words: Antarctic; Larsemann Hills; digital elevation model; CryoSat-2; GPS

First author: XIAO Feng, PhD scandidate, specialized in satellite altimetry application in polar region. E-mail: xiaofengcrazy@whu.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Shengkai, PhD, associate professor. E-mail: zskai@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41531069, 41176173; the National Major Scientific Research Program, No. 2012CB957701; the Chinese Polar Environment Comprehensive Investigation & Assessment Programme, No. CHINARE2016.