

基于 CryoSat-2 测高数据的南极局部地区 DEM 的建立与精度评定

张胜凯¹ 肖峰¹ 李斐¹ 鄂栋臣¹ 程晓²

1 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

2 北京师范大学全球变化与地球科学研究所,北京,100875

摘要:南极数字高程模型(DEM)是南极冰盖变化研究的基础数据,在我国南极重点考察地区 Dome A 及中山站至 Dome A 考察断面,利用新一代测高卫星 CryoSat-2,对常用的几种插值方法如反距离加权、克里金、径向基函数、局部多项式和最近邻点插值方法的插值精度进行交叉比较,结果显示克里金插值方法的精度最高。利用中国第 21 次南极科学考察队采集的 GPS 数据,对克里金插值方法生成的两个区域的 DEM 精度进行验证。结果表明,坡度较小的 Dome A 区域 DEM 精度较高,平均高差为 1.248 m,标准差为 0.51 m;坡度较大的中山站至 Dome A 断面区域 DEM 精度较低,平均高程差达到 3.87 m,标准差为 9.358 m。

关键词:CryoSat-2;南极;冰盖;数字高程模型;插值方法

中图法分类号:P228.41 文献标志码:A

作为全球最大的冰盖,南极冰盖变化及其对海平面上升的贡献是全球变化研究的重要内容。数字高程模型(digital elevation model, DEM)是南极冰盖研究的基础数据。DEM 地形数据可以用来制定野外探测计划,对冰盖模型进行验证,对南极物质平衡状态进行估计;利用高程数据可以确定分冰岭、冰流盆地及接地线的位置,计算冰流的大小及方向;结合冰厚数据,能够计算冰体变形的速率及应变,并且能够对冰下和基岩情况进行测量;利用冰面地形数据,可以进行冰面温度、降水、下降风的大小和方向等参数的估计;精确的地形数据对于利用遥感方法进行南极测图研究也有十分重要的意义;精确的 DEM 也是构建南极冰下地形模型 BEDMAP 的基础^[1-2]。

近 30 余年来,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全南极以及局部区域 DEM。1983 年,Zwally 等利用 Seasat 测高数据,建立了 72°S 以北、水平间距为 20 km 的南极 DEM^[3]。1984 年,Budd 等利用英国斯科特研究所(SPRI)发布的南极地图集制作了格网间距为 20 km 的南极 DEM^[4]。1987 年,利用 Geosat 雷达高度计数据,Zwally 等生成了 72°S 以北、水

平间距为 10 km 的南极 DEM^[5]。1994 年,基于 ERS-1 卫星测高数据,Bamber 等建立了分辨率为 20 km 的南极 DEM^[6]。1997 年,Bamber 等和 Zwally 等又分别利用 ERS-1 测高数据,建立了 5 km 分辨率的南极 DEM^[7-8]。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^[9]。2007 年,利用 ICESat 激光测高数据,美国国家雪冰数据中心(NSIDC)制作了 86°S 以北,分辨率为 500 m 的南极 DEM^[10]。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^[11]。2004 年,周春霞等利用 ERS-1/2 雷达影像数据建立了格罗夫山地区 DEM^[12]。2007 年,Liu 等人利用 ICESat 测高数据建立了 Dome A 区域 100 m 分辨率的 DEM^[13]。

由于使用的数据、插值方法等不同,上述 DEM 的精度各有高低^[14]。DEM 的精度与地形表面特征、采样点密度和分布以及插值方法等有关,插值方法是影响 DEM 精度的重要因素之一^[15]。本文首先利用 CryoSat-2 卫星测高数据,

收稿日期:2015-05-04

项目来源:国家 973 计划资助项目(2012CB957701,2013CBA01804);国家自然科学基金资助项目(41176173);南北极环境综合考察与评估专项基金资助项目(CHINARE2015);武汉大学珞珈青年学者资助项目。

第一作者:张胜凯,博士,副教授,主要从事极地大地测量学与冰川动力学研究。E-mail: zskai@whu.edu.cn

在我国南极重点考察地区 Dome A 以及中山站至 Dome A 断面区域,采用交叉验证方法,对反距离加权、克里金、径向基函数、局部多项式和最近邻点五种插值方法进行比较分析。然后,利用克里金插值方法,分别建立了两个区域的 DEM。最后,利用中国第 21 次南极科学考察队采集的 GPS 数据对 DEM 的精度进行验证。

1 数据

1.1 CryoSat-2 数据

2010 年 4 月,欧洲空间局成功发射 CryoSat-2 卫星,主要用于海冰厚度和冰盖高程的测量。卫星沿近地轨道飞行,高度约为 717 km,轨道周期为 369 d,轨道倾角达到 92° ,数据覆盖范围达到南北纬 88° ^[16]。

CryoSat-2 卫星上搭载了最新的合成孔径/干涉雷达高度计(synthetic aperture interferometric radar altimeter, SIRAL)。SIRAL 高度计的设计源于传统限制脉冲雷达高度计,同时结合合成孔径和干涉信号处理技术,能够实现对冰盖边缘的精确测量,并对海冰干舷高度变化进行系统检测。SIRAL 高度计以 3 种主要观测模式运行,其中低分辨率模式(low-resolution mode, LRM)主要用于坡度较小的内陆冰盖的测量;SAR 模式主要用于海冰的测量;SARIn 模式主要用于坡度较大的冰盖边缘的测量。

目前,CryoSat-2 共有三种级别的测高数据产品,分别是 L_1 层全码率数据(full bit rate data)、 L_{1b} 层多视波形数据(multi-looked waveform data)和 L_2 层高程数据。 L_1 数据是按时间序列排列的原始观测数据,同时附加了仪器和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。 L_{1b} 数据由地面轨迹点的回波组成。与 L_1 数据相比, L_{1b} 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。 L_2 数据主要包含高程和波形信息。 L_2 数据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。

表 1 给出了 CryoSat-2 卫星的工作情况。从表中可以发现,在前五个周期,卫星的工作时间没有达到预期的 369 d,其中第 4 个和第 5 个周期叠加起来,刚好满足预定的重复周期天数和飞行圈

数。本文选取第 6 个周期,即 2012-12-27~2013-12-30 期间的 CryoSat-2 L_2 测高数据,分别在 Dome A 区域和中山站至 Dome A 考察断面区域进行插值实验。图 1 和图 2 为两个试验区域的卫星轨道分布情况。为了保证数据的可靠性,本文先对数据进行筛选,比如查看卫星轨道质量指标、姿态控制指标和背向反射系数等,对不合格数据予以剔除。表 2 为 Dome A 区域和中山站至 Dome A 断面两个实验区的数据统计信息。

表 1 CryoSat-2 卫星工作情况

Tab. 1 CryoSat-2 Operational Periods

周期号	起始日期	结束日期	工作时间/d	飞行/圈数
001	2010-04-08	2010-08-01	115	2 853
002	2010-08-01	2011-02-13	196	2 853
003	2011-02-13	2011-12-24	314	5 344
004	2011-12-24	2012-06-30	189	5 344
005	2012-06-30	2012-12-27	180	5 344
006	2012-12-27	2013-12-30	369	369
007	2013-12-30	2015-01-03	369	369

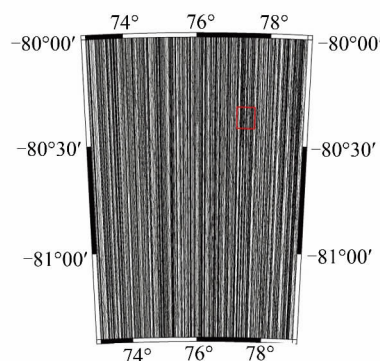


图 1 Dome A 区域 CryoSat-2 卫星轨道覆盖情况,红色方框表示 Dome A 顶部 GPS 数据采集范围

Fig. 1 Coverages of CryoSat-2 Tracks in Dome A, the Red Box Indicates the Area of GPS RTK Data

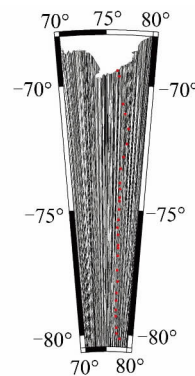


图 2 中山站至 Dome A 断面 CryoSat-2 卫星轨道覆盖情况,图中红点为 GPS 站点

Fig. 2 Coverages of CryoSat-2 Tracks in the Transect from Zhongshan Station to Dome A, the Red Points Denote the Locations of GPS Sites

表2 实验区 CryoSat-2 数据统计信息

Tab. 2 Statistics of CryoSat-2 Data in the Experimental Areas

	Dome A 区域	中山站至 Dome A 断面
经度范围	73°~79°E	70°~80°E
纬度范围	80°~81.4°S	68°~80.5°S
总点数/个	88 351	502 353
最终插值点数/个	87 984	489 972
剔除率/%	0.4	2.5

1.2 GPS 数据

2005年1月9日至11日,第21次中国南极内陆冰盖考察队利用GPS RTK测量方法获取了Dome A顶端(图1中红色方框)GPS数据。经过处理后,共有480个有效高程数据。数据呈星状分布(图3),间隔约为200m,高程精度在0.2m以内^[17]。

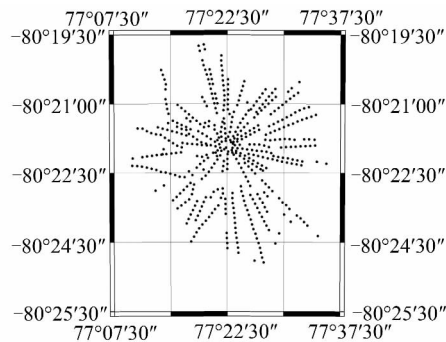


图3 Dome A 顶部 GPS 采样点分布

Fig. 3 GPS Survey Data in the Summit of Dome A

2004/2005年,第21次中国南极考察队在中山站至Dome A断面进行了GPS导线测量。导线全长约1 228 km,共有28个GPS站点,包括13个重复站点以及15个新站点(图2)。GPS数据采用GAMIT/GLOBK软件解算,高程精度优于0.2 m^[18]。

表3 Dome A 区域交叉验证结果/m

Tab. 3 Statistics of Cross Validation in Dome A Area/m

插值方法	评价指标				
	最小值	最大值	均值	标准差	RMSPE
反距离加权插值法	-22.225	31.537	0.064	2.264	2.032
克里金插值法	-23.241	26.574	-0.011	2.155	1.909
径向基函数插值法	-27.341	28.394	0.018	2.538	2.333
局部多项式插值法	-31.610	36.103	-0.014	2.232	1.995
最近邻点插值法	-37.444	40.976	0.042	2.769	2.583

表4 中山站至 Dome A 断面交叉验证结果/m

Tab. 4 Statistics of Cross Validation in the Transect from Zhongshan Station to Dome A/m

插值方法	评价指标				
	最小值	最大值	均值	标准差	RMSPE
反距离加权插值法	-1 426.596	397.750	0.084	19.398	19.372
克里金插值法	-795.321	385.329	0.056	18.013	17.985
径向基函数插值法	-1 651.262	971.935	-0.008	28.750	28.732
局部多项式插值法	-687.678	673.974	0.097	20.024	19.999
最近邻点插值法	-986.355	1 675.637	-0.268	28.344	28.327

2 插值试验与交叉验证

DEM插值是根据已知采样点的高程去估计未知高程点高程值的过程,常用的插值方法有反距离加权(inverse distance weighted, IDW)插值方法、克里金(Kriging)插值方法、径向基函数(radial basis functions, RBF)插值方法、局部多项式(local polynomial, LP)插值方法以及最近邻点(nearest neighbor, NN)插值方法等。

交叉验证(cross validation)被用来评价某一指定插值方法的质量,或者用来比较两个或多个不同插值方法的相对质量。在给定的数据样本中,用大部分样本进行网格插值,并使用建立的网格模型对预留的小部分样本进行预测,从而计算出这小部分样本的预测误差。

交叉验证的评定指标有平均估计误差百分比(PAEE)、相对均方差(RMSE)、均方根预测误差(RMSPE)以及计算残差分析等。其中,均方根预测误差可用于比较不同的插值方法,均方根预测误差越小,插值精度越高。均方根预测误差的计算公式为:

$$\text{RMSPE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [Z_i^*(X_k) - Z_i(X_k)]^2} \quad (1)$$

式中, $Z_i^*(X_k)$ 为采样点 X_k 的预测高程值; $Z_i(X_k)$ 为 X_k 的真实高程值; n 为用于交叉验证的预测采样点数。

在两个实验区分别随机选取5%的采样点作为交叉验证点,利用剩余95%的采样点进行插值测试。表3和表4分别为Dome A区域和中山站至Dome A断面的交叉验证结果。

从表 3 和表 4 可以看出,克里金插值方法在两个区域的插值精度均为最高。反距离加权方法和局部多项式方法的插值精度要低于克里金插值方法,径向基函数方法和最邻近点插值方法的插值精度最低。与其他 4 种插值方法不同,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。其他 4 种插值方法在定权过程中仅考虑了插值点和采样点之间的距离,对采样点的整体空间分布未作考虑,插值效果要劣于克里金插值方法。反距离加权插值方法的插值速度最快,但是只考虑距离插值点最近的几个采样点,对曲面的整体趋势体现不够,插值可靠性低于克里金插值方法。局部多项式插值方法虽然不属于精确的插值方法,但是通过最小二乘拟合,可以得到一个平滑的平面,适用于小范围曲面的插值。因此,在范围较小的 Dome A 区域,局部多项式插值方法略优于反距离插值方法,而在中山站至 Dome A 断面,局部多项式插值方法效果不如反距离插值方法。与局部多项式插值方法不同,径向基函数插值属于精确的插值方法,要求插值曲面必须经过每一个已知采样点,使得曲面的总曲率最小。这对于采样点较少的小范围内(如 Dome A 区域)的插值影响不大,但当采样点数较多、插值范围较大时(如中山站至 Dome A 断面),插值效果就会变差。最近邻点插值方法用每个格网节点的最近邻点值作为它的节点值,这种方法适用于采样点均匀间隔的情况,对于一般曲面插值,效果不佳。

3 DEM 精度验证

利用克里金插值方法分别生成了 Dome A 区域以及中山站至 Dome A 断面 DEM(图 4 和图 5)。DEM 分辨率为 1 km×1 km,采用极方位投影,投影椭球为 WGS84 椭球。

利用第 21 次中国南极科学考察队采集的 GPS 数据对两个区域的 DEM 进行精度验证,并与国际上 4 种常用的南极 DEM 进行比较,结果如表 5 所示。由表可知,在两个区域内,本文利用 CryoSat-2 测高数据建立的 DEM 精度优于 RAMPv2 DEM 和 JLB97 DEM,低于 Bamber 1 km DEM 和 ICESat DEM。在 Dome A 区域,坡度较为平缓,DEM 精度较高,平均高程差为 1.248 m,标准差为 0.51 m。在地形起伏较大的

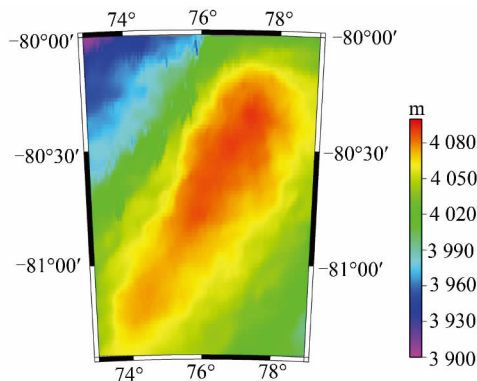


图 4 克里金插值方法生成的 Dome A 区域 DEM
Fig. 4 DEM of Dome A Area Generated by Kriging Method

中山站至 Dome A 区域,DEM 精度较低,平均高程差达到 3.87 m,标准差为 9.358 m。在此区域内,CryoSat-2 卫星采用两种测高模式,在内陆冰盖地区,采用 LRM 模式,轨道分布密集,数据采集较为均匀;而在沿海边缘地区,采用 SARIn 模式,采样点比较稀疏,并不是均匀分布的。因此,在中山站至 Dome A 区域,采样点密度差异较大,测高精度也有所差别,插值精度较低。

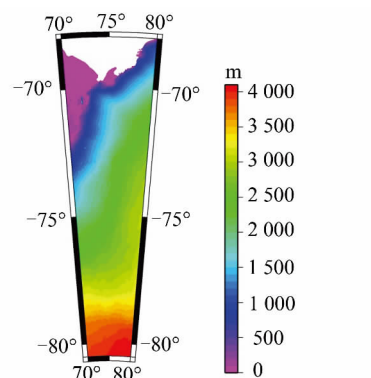


图 5 克里金插值方法生成的中山站至 Dome A 断面 DEM

Fig. 5 DEM of the Transect from Zhongshan Station to Dome A Generated by Kriging Method

表 5 Dome A 区域和中山站至 Dome A 断面 GPS 验证结果/m

Tab. 5 Statistics of GPS Validation of the Dome A Area and the Transect from Zhongshan Station to Dome A/m

	Dome A 区域		中山站至 Dome A 断面	
	平均值	标准差	平均值	标准差
Bamber 1 km DEM	1.290	0.312	1.067	4.755
ICESat DEM	0.769	0.386	3.194	7.254
RAMPv2 DEM	3.159	0.553	0.915	10.708
JLB97 DEM	7.090	0.764	8.008	11.283
本文建立的 DEM	1.248	0.510	3.870	9.358

4 结 语

利用 CryoSat-2 卫星测高数据,对反距离加权、克里金、径向基函数、局部多项式和最近邻点 5 种插值方法构建南极冰盖 DEM 的精度进行比较分析。交叉验证结果表明,在 5 种插值方法中,克里金插值方法有着很好的适应性,对于不同复杂程度的地形均能实现有效的空间插值,插值精度最高。

利用克里金插值方法分别生成了 Dome A 区域和中山站至 Dome A 断面的 DEM。采用中国第 21 次南极科学考察队采集的 GPS 数据对 DEM 进行验证,并与已有的 4 种常用南极 DEM 进行了比较。结果表明,在坡度平缓的 Dome A 区域,DEM 精度较高,平均高程差为 1.248 m,标准差为 0.51 m;在地形起伏较大的中山站至 Dome A 区域,由于坡度的原因,DEM 精度较低,平均高程差达到 3.87 m,标准差为 9.358 m。因此,在构建南极冰盖 DEM 时,选择克里金插值方法,能够有效地减少插值误差,提高 DEM 精度。同时在构建 DEM 的过程中,需要考虑坡度、数据是否均匀分布等因素对插值的影响。

致谢:感谢欧洲空间局(ESA)提供的 CryoSat-2 数据以及美国国家雪冰中心(NSIDC)提供的 JLB97 DEM、RAMPv2 DEM、ICESat DEM 和 Bamber 1km DEM 数据。

参 考 文 献

- [1] Zhang Shengkai, E Dongchen, Zhou Chunxia, et al. Progress on the Antarctic Digital Elevation Model [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2010, 18 (4): 301-309(张胜凯, 鄂栋臣, 周春霞, 等. 南极数字高程模型研究进展[J]. *极地研究*, 2009, 18 (4): 301-309)
- [2] Matthew B L, Vaughan D G. BEDMAP: A New Ice Thickness and Subglacial Topographic Model of Antarctica [J]. *J Geophys Res*, 2001, 106 (B6): 11 335-11 351
- [3] Zwally H J, Bindschadler R A, Brenner A C. Surface Elevation Contours of Greenland and Antarctic Ice Sheet [J]. *J Geophys Res*, 1983, 88: 1 589-1 598
- [4] Budd W F, Jenssen D, Smith I N. A Three-Dimensional Time-Dependent Model of the West Antarctic Ice Sheet [J]. *Ann Glacial*, 1984, 5: 29-36
- [5] Zwally H J, Major J A, Brenner A C. Ice Measurements by GEOSAT Radar Altimetry [J]. *The Navy Geosat Mission, Johns Hopkins APL Tech Dig*, 1987, 8(2): 251-254
- [6] Bamber J L. A Digital Elevation Model of the Antarctic Ice Sheet Derived from ERS-1 Altimeter Data and Comparison with Terrestrial Measurements [J]. *Ann Glacial*, 1994, 20: 48-54
- [7] Bamber J L, Bindschadler R A. An Improved Elevation Data Set for Climate and Ice-Sheet Modeling: Validation with Satellite Imagery [J]. *Ann Glacial*, 1997, 25: 430-444
- [8] Zwally H J, Brenner A C, di Marzio J. Ice Sheet Topography, Slopes and Flow Directions from ERS Altimetry [C]. The 3rd ERS Symposium, Euro Space Agency, Florence, Italy, 1997
- [9] Liu Honyxing, Jezek K C, Li Biyan. Development of an Antarctic Digital Elevation Model by Integrating Cartographic and Remotely Sensed Data: A Geographic Information System Based Approach [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104 (B10): 199-213
- [10] 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
- [11] 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
- [12] Zhou Chunxia, E Dongchen, Liao Mingsheng. Feasibility of InSAR Application to Antarctic Mapping [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(7): 619-623(周春霞, 鄂栋臣, 廖明生. InSAR 用于南极测图的可行性研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2004, 29(7): 619-623)
- [13] Liu Jiyin, Wen Jiahong, Wang Yafeng, et al. Development and Applications of Dome A-DEM in Antarctic Ice Sheet [J]. *Chinese Geographical Science*, 2007, 17(2): 160-165
- [14] 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)
- [15] Zhang Jinming, You Xiong, Wan Gang. Effects of Interpolation Parameters in Multi Log Radial Basis Function on DEM Accuracy [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38

- (5):608-612(张锦明,游雄,万刚. 径向基函数算法中插值参数对 DEM 精度的影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(5): 608-612)
- [16] 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
- [17] Zhang Shengkai, E Dongchen, Wang Zemin, et al. Surface Topography Around the Summit of Dome A, Antarctic, from Real-Time Kinematic[J]. *GPS J Glaciol*, 2007, 53(180): 159-160
- [18] Zhang Shengkai, E Dongchen, Wang Zemin, et al. Ice Velocity from Static GPS Observations Along the Transect from Zhongshan Station to Dome A, East Antarctica[J]. *Annals of Glaciology*, 2008, 48: 113-118

DEM Development and Precision Analysis in Two Local Areas of Antarctica, Using CryoSat-2 Altimetry Data

ZHANG Shengkai¹ XIAO Feng¹ LI Fei¹ E Dongchen¹ CHENG Xiao²

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

² College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: The Antarctic ice sheet plays a major role in studies of global climate change and sea-level rise, and digital elevation models (DEMs) are of great importance in geoscience studies of Antarctica. The interpolation method is one of the key factors to the accuracy of DEM. Five interpolation methods including inverse distance weighted, Kriging, radial basis functions, local polynomial, and Nearest Neighbor methods were used to develop DEMs for the Dome A area and the transect from Zhongshan station to Dome A using CryoSat-2 satellite altimetry data. A cross validation method was applied to evaluate the accuracy; the results indicate that Kriging method is the best of the five methods. Two DEMs for the two areas were generated by the Kriging interpolation method with CryoSat-2 data. The accuracy of two DEMs was assessed by GPS data from the 21st Chinese National Antarctic Research Expedition (CHINARE). The results show that the DEM of Dome A area has higher reliability with a bias of 1.248 m and standard deviation of 0.51 m. While in the steeper area in the Zhongshan station to Dome A transect, the accuracy of the DEM was low, the bias was 3.87 m and the standard deviation was 9.358 m.

Key words: CryoSat-2; Antarctica; ice sheet; DEM; interpolation method

First author: ZHANG Shengkai, PhD, associate professor, specializes in polar geodesy and glacial dynamics. E-mail: zskai@whu.edu.cn

Foundation support: The National Major Scientific Research Program, Nos. 2012CB957701, 2013CBA01804; the National Natural Science Foundation of China, No. 41176173; the Chinese Polar Environment Comprehensive Investigation & Assessment Programme, No. CHINARE2015; the LuoJia Young Scholars Program.