引文格式：李昕,胡柳茹,乔俊平,等. 利用高分七号激光测高数据评估不同全球DEMs[J]. 地理空间信息, 2024, 22(8): 93-96. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2024.08.021

利用高分七号激光测高数据评估不同全球DEMs

李　昕[1]，胡柳茹[1*]，乔俊平[1]，蔡扬扬[1]
（1. 自然资源部第一地形测量队，陕西 西安 710054）

摘　要：全球数字高程模型（DEM）作为重要的测绘产品广泛应用于各个领域。随着对地观测技术的发展，我国全球测图如火如荼地开展，针对获取困难的空白地区，需要利用不同全球或近全球尺度的DEM产品进行补充。结合高分七号激光测高数据对不同全球DEMs的适用性进行评估，尤其是基于不同的地表覆盖类型的高程精度评估。主要采用陕西渭南地区的激光测高数据，对SRTM-1 DEM，ASTER GDEM2，AW3D30 DEM和TanDEM-X 90 m DEM进行精度评估。同时，利用全球30 m地表覆盖数据（GlobeLand30）对激光测高点处的地表进行分类，并对不同的全球DEMs进行分地表覆盖类别统计分析。结果显示，AW3D30 DEM的整体高程精度良好，ASTER GDEM的高程精度整体不佳，TDX90 DEM的精度受植被的影响较大。

关键词：高分七号；激光测高；全球DEMs；GlobeLand30；精度评估
中图分类号：P282　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）08-0093-04

Accuracy Assessment of Global DEMs Based on GF-7 Laser Altimetry Data

LI Xin[1], HU Liuru[1], QIAO Junping[1], CAI Yangyang[1]
(1. The First Topographic Surveying Brigade of Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Xi'an 710054, China)

Abstract: The global digital elevation model (DEM) is widely applied in various fields as an important mapping and survey product. With the development of earth observation technologies, global mapping is in full swing in China. However, gap areas where access is difficult need to be supplemented with different open or near-global coverage DEM datasets. In this work, we used the GF-7 laser altimetry datasets to assess the accuracy of global DEMs, especially based on different land cover. We assessed SRTM-1 DEM, ASTER GDEM2, AW3D30 DEM and TanDEM-X 90m DEM by laser altimetry over the Weinan City of Shannxi Province in China, and classified the land cover of laser altimetry spot by GlobeLand30 dataset. Then, we categorized the different global DEMs for statistical analysis. The results show the accuracy of AW3D30 is high, the accuracy of ASTER GDEM is worse, and the accuracy of TDX90 DEM is affected by vegetation.

Key words: GF-7, laser altimetry, global DEMs, GlobeLand30, accuracy assessment

基于筛选后的激光测高数据作为高程控制点，验证数字高程模型精度已经得到广泛应用[1-3]。本文针对搭载了双线阵立体相机和全波形激光测高仪的国产对地观测高分七号卫星，利用激光测高数据评估全球数字高程模型（digital elevation model, DEM）的精度，从而实现业务化应用分析。目前，可获取的全球DEM产品主要包括：Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) DEM[4]，ASTER GDEM2[5-6]，the Advanced Land Observing Satellite (ALOS) World 3D 30 m （AW3D30）DEM[7-8]和TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurements (TanDEM-X) 90 m （TDX90） DEM[9-11]。其中，ASTER GDEM2和AW3D30 DEM采用立体影像摄影测量方法获得，而SRTM DEM和TanDEM-X DEM由干涉合成孔径雷达（interferometric synthetic aperture radar，InSAR）技术生成。

国内的全球地理信息资源建设与维护更新和实景三维建设项目如火如荼地开展，其中DEM作为重要的产品，采用资源三号立体影像摄影测量方法进行生产[12]。伴随着利用立体影像进行密集匹配，从而生成DSM和DEM的方法在实际生产中大范围应用，传统的立体采集逐步被淘汰。但由于困难地区搜集的数据有限，会存在空白地区，需要利用全球公开的其他DEMs进行补充。而如何评估不同地表覆盖类型下的全球DEMs的精度及可靠性是关键问题。因此本实验通过高分七号激光测高数据对不同全球DEMs进行分地表覆盖类型高程精度评估，不仅进一步验证了激光

收稿日期：2022-12-26。
项目来源：陕西测绘地理信息局课题资助项目（SCK2021-07）。
第一作者简介：李昕（1985—）硕士，高级工程师，注册测绘师，研究方向为地图可视化、数字化遥感信息服务、国土空间数据治理，E-mail：shasmlee@outlook.com。
通信作者：胡柳茹（1991—），博士研究生，工程师，注册测绘师，研究方向为卫星遥感大数据、激光测高，E-mail：hulr@qq.com。

测高数据精度评估的可靠性，同时评估了不同全球DEMs的适用性和准确性，为后期改进DEM技术流程提供了借鉴作用。

1 高分七号激光测高数据精度评估方法

利用高分七号激光测高数据对不同的全球DEMs进行精度评估，主要有以下几个步骤。

1）下载并合并DEM，并提取高分七号激光测高点。

2）对高分七号激光测高点进行滤波，筛选出可靠性高的激光点[2,13]，主要根据高程质量控制标识m_ECP_Flag，代表推荐激光点作为高程控制点的建议。m_ECP_Flag是基于SRTM DEM的粗差剔除、测距属性参数的粗粒度筛选、回波波形特征参数的精细筛选以及GlobeLand30（30 m全球地表覆盖数据）的地物筛选的多准则约束高程控制点筛选结果，其中1代表激光点非常适合作为高程控制点使用，高程精度非常可靠，2代表激光点能作为高程控制点使用，m_ECP_Flag的值为其他时则建议适当降权。

3）将激光测高数据与DEM转换到相同的高程系统（本文选择WGS84高程基准）。

其中SRTM -1 DEM，ASTER GDEM2和AW3D30 DEM为EGM96大地水准面高程，激光测高数据和TDX90 DEM为WGS84椭球体高程，两者之间的转换为：

$$h=H+N \tag{1}$$

式中，h为WGS84基准下的椭球高；H为EGM96基准下的正高；N为大地水准面差距。

4）利用提取后的高分七号激光测高数据对不同的DEMs进行整体精度评估。根据全球30 m地表覆盖数据得到不同的地表覆盖类型，分类别对不同的地表覆盖类型进行精度评估及分析。

2 数据集概括

2.1 SRTM DEM

SRTM主要来源于美国宇航局（national aeronautics and space administration，NASA）和美国国防部国家测绘局（national imagery and mapping agency，NIMA）[4]。SRTM覆盖全球60°N和56°S之间的范围，覆盖80%以上的陆地地表，来源于C-波段和X-波段的2颗SAR数据。于2003年发布了第一个版本，在2014年9月23号，SRTM-1 V3 DEM产品可以针对全球进行免费获取。SRTM以5°经纬度方格进行数据组织，分为24行和72列。

2.2 ASTER GDEM

ASTER探测器于1999年建于日本经贸工业部（ministry ofeconomy, trade and Industry， METI），并利用美国宇航局Terra航天器发射。其空间分辨率为15 m，使用了大概1 500 000对立体像对。

ASTER GDEM （先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型）version 1 （ASTER GDEM V1）产品于2009采用全自动处理流程处理立体影像。其范围包括了83°N到83°S之间99%陆地面积，赤道处水平分辨率为30 m。ASTER GDEM V2于2011在第一版本的基础上进行了改进，提高了空间分辨率和高程精度，同时重新处理了250 000景立体像对。ASTER GDEM V2为本实验采用的数据集。ASTER GDEM V3于2019年发布，在V2的基础上，新增了36万对光学立体像对，从而减少了高程值空白区域和水域异常值。

2.3 ALOS WORLD 3D 30 m （AW3D30） DEM

日本宇宙航空研究开发机构（japan aerospace exploration agency，JAXA）于2006年1月24日发射ALOS卫星，搭载了全色遥感立体测绘仪PRISM（panchromatic remote-sensing instrument for stereo mapping）。利用2.5 m分辨率的ALOS立体影像，生成5 m格网的全球Advanced World 3D （AW3D） DEM[7,8]。云、雪和冰区在处理过程中自动识别并进行掩膜处理，但是在云、雪和冰区附近仍会存在不匹配的点，从而导致DSM高程异常。

在2017年3月，JAXA发布了30 m分辨率的AW3D30 DEM Version 1.1。2018年4月发布的Version 2.1增加了60°N到60°S的无数据或低质量区域的数据。版本Version 2.2于2019年4月发布，主要改进了60°N以上的数据，同时更新了海岸线，即为本次数据集使用的版本。

2.4 TanDEM-X 90 m （TDX90） DEM

TanDEM-X是由EADS Astrium公司与德国宇航中心于2010年成功送入预定轨道，其主要任务是生成一个连贯的高精度3D DEM[9,11]。TanDEM-X （TDX）与TerraSAR-X （TSX）在轨道上协同工作，采用空间基线可变（从200 m到几km）的双星的编队飞行模式，2颗卫星构成一台雷达干涉仪[10]。

德国宇航局利用2010—2015年之间采集的数据，于2016年9月完成12 m分辨率的全球DEM数据生产（仅可通过商业获取），绝对高程误差约为1 m。TanDEM-X 90 m （TDX90）DEM是德国航空局发布的全球DEM产品，属于派生产品，像素间距降为3″，赤

道的空间分辨率为90 m，即为本文使用的数据集。

2.5　GlobeLand30

全球30 m地表覆盖数据（GlobeLand30）覆盖南80°N的陆地范围[14-16]。利用30 m多光谱影像，包括美国陆地资源卫星（Landsat）TM5、ETM+多光谱影像和中国环境减灾卫星（HJ-1）多光谱影像，并使用辅助数据和参考资料，对全球的地表覆盖进行分类。30 m地表覆盖的数据主要包括耕地（代码为10）、森林（代码为20）、草地（代码为30）、灌木地（代码为40）、湿地（代码为50）、水体（代码为60）、苔原（代码为70）、人造地表（代码为80）、裸地（代码为90）、冰川和永久积雪（代码为100）等10个一级地表覆盖类型。

其中，GlobeLand30数据采用空间参考基准为WGS84坐标系，UTM投影的，6°分带，参考椭球为WGS 84椭球。

表1　不同全球DSMs概述

DEM类别	生产方式	格网间距	地理基准	高程基准	高程精度/m
SRTM DEM	C-band InSAR	1″/3″	WGS84	EGM96	16
ASTER GDEM	ASTER stereopairs	1″	WGS84	EGM96	20
AW3D30 DEM	PRISM stereopairs	1″	WGS84	EGM96	3
TDX90 DEM	X-band InSAR	3″	WGS84	WGS84	10

3　实验分析

3.1　实验区域

华阴地区位于陕西省中东部，涉及陕西省渭南市、商洛市以及山西省运城市，平地、丘陵地、山地、高山地均有分布，范围为109°50′00"~110°21′30"E，34°8′30"~34°59′30"N。华阴地区属中部地区，气候为温带大陆季风性气候，地形南高北低，森林覆盖度较高。实验区内有丰富地表覆盖分布类型，其中以耕地占主要，林地次要，由于草地、湿地、水体、人造地表等地表覆盖面积较小，因此合并入其他地类进行分析。在影像覆盖范围中，主要集中于人烟稀少的地区，因此主要的地表覆盖类型为耕地与林地。

3.2　实验数据及精度

华阴地区的数据坐标系统为WGS-84大地坐标系，采用地理坐标。高程系统为基于WGS-84椭球的大地高程系统，单位为m，小数点后保留3位（0.001 m）。

高分七号激光测高数据于2020年4月—2020年5月获取，经过筛选后共93个，分布于6个影像对[2,13]。利用“陕西北斗卫星导航定位基准站系统”，采用网络RTK进行外业检测点采集，对激光测高数据成果检测外业精度，高程精度的中误差为2.208 m，平均高程误差为0.872 m，说明激光测高数据具备较高的高程测量精度，可作为参考数据评估不同全球DEM产品的质量。高分七号地面激光足印直径为19 m（波束1）和21 m（波束2），激光落点平面误差优于6.0 m。本次实验主要利用m_ECP_Flag为1的激光点为单峰激光点，即选取的激光点为在不同地表覆盖类型的平坦地区回波信息，且在回波范围内的高程变化小，可忽略平面误差带来的影响。同时，由于在精度评估之前已对激光点进行了筛选，因此即使在森林区域，也是选择了森林区域内的平地且波峰为1的激光点，将受植被干扰大的激光点已剔除。

如上所述，全球DEMs采用SRTM DEM、ASTER GDEM、AW3D30 DEM和TDX90 DEM，标称精度分别为16、20、3 m和10 m，具体参数见表1。

3.3　不同全球DEM高程精度评估

将激光测高数据对不同的全球DEMs进行统计，见表2。由于2种不同分辨率的SRTM DEM的标称高程精度相同，因此本次实验主要采用SRTM 1 arc DEM。从平均值分析，TDX90 DEM最小，但对绝对值的平均值进行统计分析，AW3D30 DEM的精度最佳，ASTER GDEM误差最大。AW3D30 DEM的中误差、绝对值最大值和绝对值最小值都远小于其他DEMs，而ASTER GDEM的平均值和绝对值平均值都相对较大，与表1中标称精度相符。值得注意的是，TDX90 DEM最大值远超于标称精度，且在最大值的点处其他DEMs的高差并未异样，说明TDX90 DEM存在粗差点，而此粗差点对中误差的评估的也造成了较大的影响。

表2　不同全球DSMs高程精度评估/m

DEMs	平均值	绝对值平均值	中误差	绝对值最大值	绝对值最小值
SRTM 1 arc DEM	2.953	3.782	7.405	40.880	0.021
ASTER GDEM	5.548	7.816	9.991	41.427	0.052
AW3D30 DEM	1.502	2.525	3.432	12.430	0.003
TDX90 DEM	-0.389	5.047	18.820	156.40	0.011

3.4　不同地表覆盖精度评估

本次实验利用高分七号数据对不同的全球DEMs在耕地（GlobeLand30=10）、森林（GlobeLand30=20）以及其他地表覆盖类型进行分类型统计分析，统计结果见表3。在3种典型地形类别之中，森林区域对应

的高程精度最差，最大值中出现的粗差点都集中在森林区域，说明植被覆盖对不同DEMs的整体精度都存在影响。对耕地覆盖区的统计结果表明，TDX90 DEM精度最佳，AW3D30 DEM次之，其中ASTER GDEM精度最差，但是SRTM 1 arc DEM存在较大的粗差点，且仅TDX90 DEM的绝对值最大值在标称高程精度范围内。而在森林区域的统计分析结果中，由于TDX90 DEM存在粗差点，因此其绝对值平均值、中误差和绝对值最大值最大，AW3D30 DEM的精度最佳。同时，在森林区域，4种DEMs绝对值最大值都超出了标称高程精度范围，说明DEM在森林区域具有更大的概率存在粗差点，植被对DEM的高程精度影响较大。在其他区域的统计分析上，AW3D30 DEM和TDX90 DEM在绝对值平均值、中误差和绝对值最大值的高程误差相近，但TDX90 DEM的平均值小于AW3D30 DEM，ASTER GDEM虽精度不佳，但仅限于标称精度范围内。在这3种不同地表覆盖类型中，SRTM DEM在其他地表覆盖类型的精度最佳。

表3 基于不同地表覆盖的不同全球DEMs高程精度评估/m

GlobeLand30	DEMs	平均值	绝对值平均值	中误差	绝对值最大值	绝对值最小值
10	SRTM 1 arc DEM	2.171	2.560	5.321	40.880	0.021
	ASTER GDEM	6.161	6.830	7.908	21.960	0.053
	AW3D30 DEM	1.437	2.272	3.131	12.430	0.003
	TDX90 DEM	0.128	1.106	2.084	8.868	0.011
20	SRTM 1 arc DEM	10.596	14.844	17.740	37.095	3.892
	ASTER GDEM	3.324	16.187	20.645	41.428	2.928
	AW3D30 DEM	1.673	4.854	5.464	8.887	0.433
	TDX90 DEM	−5.072	40.470	60.109	156.402	3.609
其他	SRTM 1 arc DEM	1.726	3.009	3.553	5.830	0.912
	ASTER GDEM	1.664	7.899	9.504	16.913	1.415
	AW3D30 DEM	2.006	2.322	3.208	5.802	0.407
	TDX90 DEM	−0.056	2.864	3.577	6.807	0.073

4 总结与展望

对4种全球DEMs和全球30 m地表覆盖数据进行概述，利用高分七号对现有通用的全球DEMs进行整体评估和分地类精度评估，根据上述结果可得到以下结论：

1）除了耕地的精度评估中，AW3D30 DEM都有最佳的高程精度。这一结果与表1中AW3D30 DEM的标称精度最优相符合。

2）TDX90 DEM的精度受森林的影响较大，在森林区域会有较大的粗差从而影响整体精度评估。而在耕地和其他地表覆盖类型的统计分析中，都具有较高的精度。

3）ASTER GDEM的高程精度整体不佳，与表1中其高程标称精度最差相对应。由于本实验以收集高分七号范围作为研究区域进行统计分析，选取的实验区域有限，因此样本数量不够庞大，粗差点对统计精度会造成较大影响，同时也有助于发现森林覆盖范围内的DEMs存在粗差点及其影响，以便后期流程设计中作为重点考虑因素。但从结果显示，精度评估结果与标称精度整体相符，有效地验证了高分七号激光测高数据对不同全球DEMs精度评估能力，并且为后期利用多模型、多基线算法自动匹配获取DEM以及雷达干涉测图生成DEM生产流程优化提供了有效的借鉴作用，同时也为高分七号的业务化应用提供了可行性的实施方案。

参考文献

[1] Liu Z, Zhu J J, Fu H, et al.Evaluation of the Vertical Accuracy of Open Global DEMs over Steep Terrain Regions Using ICESat Data: A Case Study over Hunan Province, China[J].Sensors, 2020, 20:4 865

[2] 胡柳茹，唐新明，张智，等.高分七号卫星多源遥感数据精度优化与评估[J].红外与激光工程，2022，51(6):230-239

[3] 胡柳茹，唐新明，李国元，等.利用GLAS激光测高数据评估DSM产品质量及精度优化[J].测绘通报，2019(11):39-43

[4] O'loughlin F E, Paiva R C D, Durand M, et al.A Multi-sensor Approach Towards a Global Vegetation Corrected SRTM DEM Product[J].Remote Sensing of Environment, 2016, 182:49-59

[5] Tachikawa T, Hato M, Kaku M, et al. Characteristics of ASTER GDEM Version 2[C]//2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011:3 657-3 660

[6] Takaku J, Tadono T, Tsutsui K.Generation of High Resolu-

（下转第115页）