

引用格式: 赵尚民,程维明,蒋经天,等资源三号卫星DEM数据与全球开放DEM数据的误差对比[J].地球信息科学学报,2020,22(3):370-378. [Zhao S M, Cheng W M, Jiang J T, et al. Error comparison among the DEM datasets made from ZY-3 satellite and the global open datasets[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(3):370-378.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190658

资源三号卫星DEM数据与全球开放DEM数据的误差对比

赵尚民¹,程维明²,蒋经天³,沙文娟⁴

1. 太原理工大学矿业工程学院测绘科学与技术系,太原 030024; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101; 3. 东方通用航空摄影有限公司,太原 030031; 4. 苏州中科天启遥感科技有限公司,苏州 215163

Error Comparison among the DEM Datasets Made from ZY-3 Satellite and the Global Open Datasets

ZHAO Shangmin^{1*}, CHENG Weiming², JIANG Jingtian³, SHA Wenjuan⁴

1. Department of Surveying and Mapping, College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Eastern General Aero photography Company Limited, Taiyuan 030031, China; 4. Suzhou Image Sky International Company Limited, Suzhou 215163, China

Abstract: Global open DEM datasets provide important data sources for digital topographic analysis. Compared to the existing global open DEM datasets, the DEM data made from ZY-3 Satellite have higher spatial resolution, wider coverage and better currency, which results to a great likelihood to produce a global DEM dataset with high quality from ZY-3 Satellite. So the error comparison among the DEM datasets made from ZY-3 Satellite and the global open datasets will provide scientific basis for the global DEM dataset production made from ZY-3 Satellite data. Taking the Taiyuan City (the middle region of Shanxi Province) as a test area, this paper made an error comparison among the DEM datasets made from ZY-3 Satellite (ZY-3 Satellite DEM) and three typical global open DEM datasets (AW3D30, SRTM1 and ASTER GDEM) based on the referencing DEM data produced by laser-point cloud data with high accuracy. Meanwhile, the mean value, mean absolute value, root mean square value and standard deviation value are computed for the absolute error and the relative error at different slope classes. The research results show: (1) the error distributions for all of the four DEM datasets show relatively good symmetry. Meanwhile, the mean error value is approximate to 0 m, especially for the SRTM1 and ASTER GDEM data. So the root mean square error values and the standard deviation error values are approximate for all the four DEM datasets. (2) ZY-3 Satellite DEM has the lowest root mean square error value (4.6 m), so it has the highest accuracy. The next is the AW3D30 data (with root mean square error value of 5.6 m), then the SRTM1 data (with root mean square error value of 8.8 m). ASTER GDEM has the highest error values (with root mean square error value of 12.6 m), so it

收稿日期:2019-11-05;修回日期:2019-12-25.

基金项目:山西省自然科学基金项目(201901D111098);国家重点研发计划项目(2017YFB0503603);国家自然科学基金项目(41771443、41421001、41590845)。 [**Foundation items:** Natural Science Foundation of Shanxi Province, No.201901D111098; National Key Research and Development Program of China, No.2017YFB0503603; National Natural Science Foundation of China, No.41771443, 41421001, 41590845.]

作者简介:赵尚民(1982—),男,河南洛阳人,博士,副教授,主要从事数字地形地貌与生态环境遥感研究。

E-mail: zhaoshangmin@tyut.edu.cn

has the lowest accuracy. Meanwhile, the relative error and the absolute error show similar rules for the four DEM datasets. (3) The errors of the ZY-3 Satellite DEM, SRTM1 and ASTER GDEM data rise with slope increasing. The error of AW3D30 data shows an undulation tendency of rising first, and then falling with slope increasing. The error for the AW3D30 data is lower than that for the SRTM1 data at any slope classes except for the $0^{\circ}\sim 2^{\circ}$ class. At all the slope classes, ASTER GDEM data has the highest error values of all. Overall, compared to other three DEM datasets, ZY-3 Satellite DEM data has the lowest error values and the highest accuracy at all the slope classes.

Key words: ZY-3 Satellite DEM; global open DEM datasets; absolute error; relative error; slope; AW3D30; SRTM1; ASTER GDEM; Taiyuan City

***Corresponding author:** ZHAO Shangmin, E-mail: zhaoshangmin@tyut.edu.cn

摘要:全球开放DEM数据为数字地形分析提供了重要数据源。与已有的全球开放DEM数据相比,资源三号卫星具有更高的空间分辨率、更大的覆盖范围和更好的现势性。将资源三号卫星生成的DEM数据与全球开放DEM数据进行误差对比则为基于资源三号卫星的全球DEM数据研制提供科学依据。本文以山西省中部太原市为研究区,基于高精度激光点云数据生成DEM为参考数据,对资源三号卫星影像生成的DEM数据与全球典型的开放DEM数据(AW3D30、SRTM1和ASTER GDEM)的误差进行了对比分析,并获得了其在不同坡度等级下绝对误差与相对误差的平均值、平均绝对值、均方根值和标准偏差值。研究结果表明:①4种DEM数据的误差分布均具有较好的对称性。同时,平均误差接近于0 m, SRTM1和ASTER GDEM数据更是如此。因此均方根误差值与标准偏差值近似一致;②资源三号DEM具有最高的精度,误差最小(均方根误差4.6 m)。其次为AW3D30数据(均方根误差5.6 m)和SRTM1数据(均方根误差8.8 m)。ASTER GDEM数据误差最大(均方根误差12.6 m),精度最差;③资源三号DEM、SRTM1和ASTER GDEM数据的误差均随坡度的变大而增大,而AW3D30数据误差随着坡度增加呈现先减小后增大的趋势。总体上,与其他3种DEM数据相比,资源三号DEM在所有坡度范围均具有最小的误差值。

关键词:资源三号DEM;全球开放DEM;绝对误差;相对误差;坡度;AW3D30;SRTM1;ASTER GDEM;太原市

1 引言

DEM数据通过有序数值阵列的形式表达地面高程,进而实现对地球表面形态的数字化模拟。作为重要的基础地理数据产品,DEM数据在地形地貌、自然灾害、气候气象、水文、土壤和环境保护等科学与工程领域得到广泛应用^[1-6]。自美国地球物理中心于1988年免费发布的第一个全球开放DEM数据ETOPO5被广泛应用之后^[7],各种高精度、高分辨率的全球开放DEM数据陆续免费发布,并在全球和区域规模的地形分析和地学研究中发挥重要作用^[8-10]。然而,DEM数据在不同领域应用的可靠性和保障则主要取决于其精度或误差状况^[11-13]。因此,对全球开放DEM数据进行精度或误差分析成为一个重要的热点研究领域^[14-16]。

我国的资源三号三线阵卫星相对已有的全球DEM数据,具有更高的空间分辨率、覆盖范围和现势性,为生成更高质量和精度的全球DEM数据提供了重要的数据源基础。目前,对于资源三号卫星生成的DEM数据的精度评价主要基于地面检核点、地形图控制点和地形图生成的DEM进行单独分析^[17-20],而将其与全球开放DEM数据的误差对比

研究则相对有限^[21-22]。因此,对比资源三号卫星生成的DEM数据与目前的全球开放DEM数据的误差状况对区域和全球地形分析和地学研究具有重要意义,并为基于资源三号卫星的全球DEM数据研制提供一定科学依据和重要参考。

本研究以山西省中部太原市为研究区,基于高精度激光点云数据生成的DEM对资源三号卫星制作的DEM与典型的全球免费DEM数据(AW3D30 DEM、SRTM1 DEM和ASTER GDEM)进行误差对比与评价,对基于资源三号卫星研制的DEM数据在地形分析和地学研究中的应用、及更大范围的DEM数据研制等提供借鉴和参考。

2 研究区概况与数据源

2.1 研究区概况

本研究选山西省中部太原市及其周围区县为研究区(图1)。研究区中部为太原盆地北部地区,东部和西部分别为东山和西山部分地区。地势图基于激光点云数据生成的DEM数据制作,从地势图1可以看出:研究区海拔高度761~1861 m,中间盆地地势平坦,两边则为起伏的山地地形。不同的

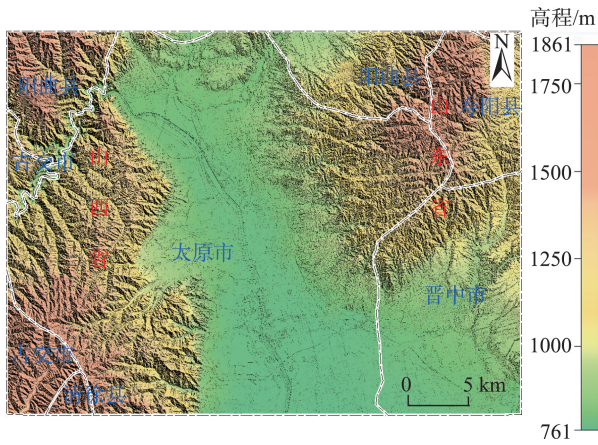


图1 山西省中部太原市及其周围区县地势

Fig. 1 Relief map of the research area of Taiyuan city

地形分布状况为分析误差在不同坡度状况下的分布差异提供了条件。

2.2 数据源

本研究所用的数据源主要包括各种DEM数据：基于激光点云的参考DEM数据、资源三号卫星研制的DEM数据和3种全球典型的免费开放DEM数据(AW3D30 DEM、SRTM1 DEM和ASTER GDEM)。各种DEM数据的基本情况如表1所示。在表1中，不同DEM数据的精度指标不完全一致。

在各种DEM数据中，参考DEM数据由东方通用航空摄影有限公司于2014年通过航空摄影方法获取，主要基于徕卡公司的机载激光扫描系统——ALS60(配备机载GPS系统和IMU系统)。ALS60每s可发射20万个激光点，可以高精度地获取高密度激光点云(原始激光点在地面间隔旁向可以达到0.1 m甚至更小)。同时，ALS60具有多次回波记录功能，这些系统记录的回波信息可以是地物顶部、底部以及之间的任何位置，每个回波同样有三维坐标记录。通过激光点云检校、GPS/IMU解算和处理生成的参考DEM数据的空间分辨率为5 m。将

3269个野外检查点高程与参考DEM数据对应位置的内插高程值进行对比，差值基本呈正态分布，高程精度(中误差)为0.15 m，能够满足本研究各种DEM数据精度评价的要求。

资源三号卫星研制的DEM数据由苏州中科天启遥感科技有限公司利用PixelGrid—SAT软件制作。首先基于2.1 m和3.5 m空间分辨率的立体像对(即ZY3 NAD和ZY3 DLC数据)，利用网络分布式并行与多核并行计算及匹配技术获取具备坐标信息的三维密集点云，并对三维密集点云融合与地形提取技术获得初步DSM。以区域网平差生成的DOM成果为平面定位控制检验依据，以TerraSAR生成的World DEM数据为高程控制检验依据，对平面精度、高程精度、异常值、云区、水域、道路等进行检查，最终辅以智能化的人机交互编辑等手段生成合格的资源三号DEM数据。最终生成的数据空间分辨率5 m，平面中误差小于5 m，高程中误差小于8 m。

AW3D30 DEM、SRTM1 DEM和ASTER GDEM均为目前全球免费开放的空间分辨率最高(30 m)的DEM数据。AW3D30 DEM由日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)研制(下载网址：<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>)，它源自ALOS卫星搭载的全色遥感立体测绘仪(PRISM)采集的300万个场景的光学立体像对数据，首先生成的是全球5 m的DSM产品，全球范围内平均3.4 m，并以此重采成30 m并免费发布，被称为是30 m尺度上精度最高的全球免费DEM产品。SRTM1 DEM属于雷达产品(下载网址：<https://earthexplorer.usgs.gov/>)，平面精度约20 m，高程实际精度约9 m，于2000年由航天飞机采集，是当时世界上精度最高的DEM产品，并在地形分析领域产生重要影响。ASTER GDEM数据采用2019年8月发布的第三版本(V3)的产品(下载网址：<https://earthdata.nasa.gov/>)，是世界上最先免费发布的全

表1 各种DEM数据简介

Tab. 1 Brief Introduction to the DEM datasets in this research

DEM数据	空间分辨率/m	精度*/m	获取时间/年	覆盖范围
参考DEM	5	0.15	2014	太原市及周边地区
资源三号DEM	5	8	2019	南北纬84°之间
AW3D30 DEM	30	3.4	2006—2011	南北纬82°之间
SRTM1 DEM	30	9	2000	南北纬60°之间
ASTER GDEM	30	12.6	2000—2009	南北纬83°之间

注：*不同数据源的精度指标不完全一致。

球 30 m 尺度的 DEM 数据,它基于 ASTER 传感器采集的空间分辨率为 15 m 的 188 万个立体像对,其第二版数据经精度检验:在日本区域的标准偏差误差为 12.6 m。

在进行误差评价的 4 种 DEM 数据集中, SRTM1 DEM 是唯一的雷达产品,而且数据采集时间最早; ASTER GDEM 是第一次由立体像对生成的全球 DEM 数据; AW3D30 DEM 数据是目前宣称的 30 m 尺度上精度最高的全球 DEM 数据; 资源三号卫星立体像对具有最大的覆盖范围、地面分辨率和现势性,但目前还没有生成全球 DEM 产品。

3 误差评价方法

3.1 绝对误差计算方法

绝对误差指真实值与观测值之差,在本研究中主要指参考 DEM 与其他 DEM 数据的差,其计算方法如式(1)所示。

$$AE = DEM_s - DEM_r \quad (1)$$

式中: AE 指绝对误差; DEM_r 指参考 DEM 数据,即激光点云生成的高精度 DEM 数据,代表真实值; DEM_s 指其他需要进行误差评价的 DEM 数据,包括资源三号卫星生成的 DEM 数据和全球免费发布的 30 m DEM 数据,包括 AW3D30 DEM、SRTM1 DEM 和 ASTER GDEM。

绝对误差计算一般选择点对点之间的数值之差,如利用 GPS 点、ICESat/GLAS 点和地形图控制点等。在本研究中,由于不同 DEM 数据的空间分辨率并不一致。考虑到很多分析采用 3 像元×3 像元的窗口进行统计,而 3 种全球开放 DEM 数据的空间分辨率为 30 m。因此通过取整和实验,选择在实验区按照 100 m 的采样间隔进行均匀采样,共得到 182 286 个采样点。然后通过线性插值方法获得采样点的各种 DEM 数据的高程值,进而计算出不同 DEM 数据的绝对误差。

3.2 相对误差计算方法

相对误差主要用来衡量相邻点或邻近点之间从参考 DEM 和其他 DEM 数据中提取的高程值之间的匹配程度^[23],其不同情形如图 2 所示。

从图 2 可以看出:在情形“A”中,相邻点之间从参考 DEM 和其他 DEM 提取的高程值的变化趋势一致;在情形“B”中,这种变化情况则相反。为了对这种变化趋势进行定量评价,本研究中主要采用相

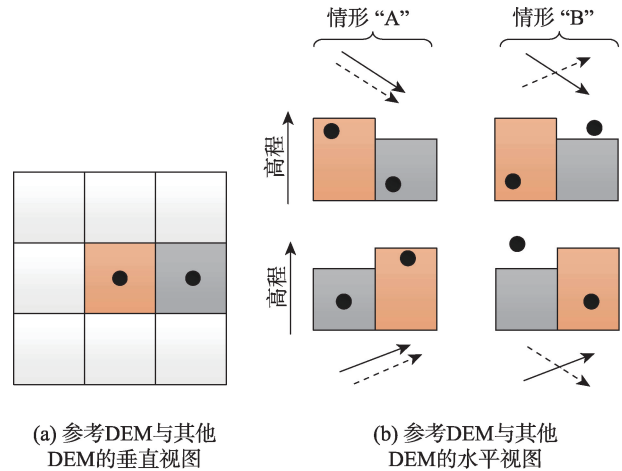


图 2 参考 DEM 与其他 DEM 数据之间相对误差计算方法的示意^[23]

Fig. 2 Diagram of computation method of the relative error between referencing DEM and other DEM data

对误差来衡量,它相邻点或邻近点的绝对误差之差与距离的比值。类似于坡度,在本研究中以百分比形式显示,其计算方法如式(2)所示。

$$RE = (AE_i - AE_j) / D_{ij} \times 100\% \quad (2)$$

式中: RE 指相对误差, AE_i 指采样点 i 的绝对误差; AE_j 指采样点 j 的绝对误差; D_{ij} 指采样点 i 与采样点 j 的水平距离。

在本研究中,由于采样点为均匀采样,因此主要选取采样点及其周边 8 个邻近点作为相邻点对,同时去除一半对称的情况,最终获取共 726 557 对采样点对。根据每个采样点对中 2 个点的绝对误差和其水平距离,利用式(2)计算其相对误差。

3.3 误差评价指标

为了对绝对误差和相对误差进行统计分析,本研究选取平均误差(ME)、平均绝对值误差(即误差绝对值的平均值,MAE)、均方根误差(RMSE)和标准偏差(STD)4个指标进行计算,其计算方法如公式(3)–(6)所示。

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - y_i) - ME]^2}{n - 1}} \quad (5)$$

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - y_i)^2]}{n-1}} \quad (6)$$

式中:对绝对误差来说, n 指采样点的数量; x 和 y 分别指采样点基于参考DEM和其他DEM采样值;对相对误差来说, n 指采样点对的数量; x 和 y 分别指采样点对中2个点的绝对误差。

除了上面4个指标外,由于本研究区地形起伏明显,坡度变化显著,参考中国数字地貌数据库中对地形坡度的分级^[24],基于参考DEM数据生成实验区的坡度数据,并以 2° 、 7° 、 15° 、 25° 和 35° 为间隔将其分为6个等级,从而获取各种DEM数据在不同坡度等级下的误差分布状况。

4 不同DEM数据误差对比分析结果与讨论

4.1 绝对误差对比分析

基于参考DEM数据,资源三号卫星DEM数据和其他3种全球免费DEM数据的绝对误差评价指标计算结果和直方图分布如图3所示。

从图3可以看出:4种DEM数据的平均误差(ME)均大于0 m,其中SRTM1 DEM和ASTER GDEM V3数据平均误差较小,其次为资源三号DEM,AW3D30 DEM平均误差最大;在误差分布集中性上,资源三号DEM数据最集中,其次为AW3D30 DEM,然后是SRTM1 DEM,ASTER

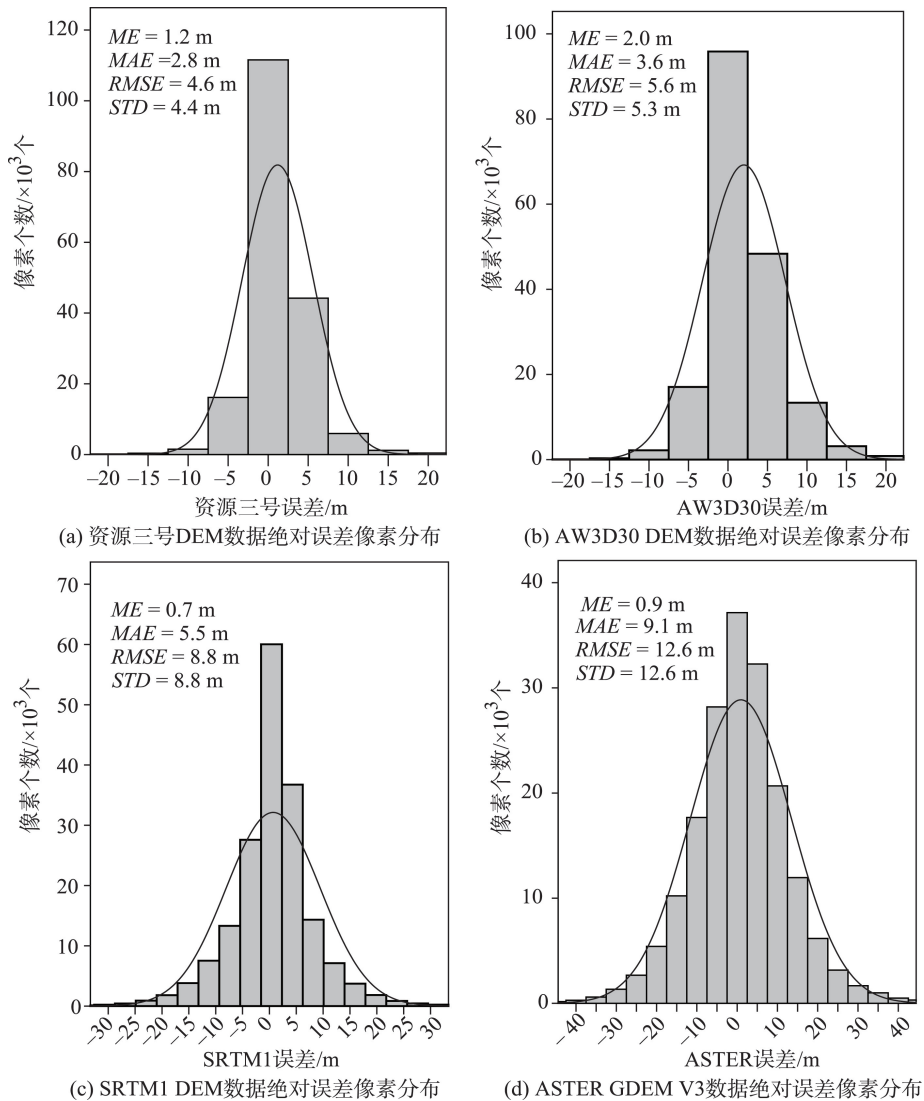


图3 4种DEM数据绝对误差在不同数值范围的像素个数分布

Fig. 3 Pixel number distribution of the absolute error values at different numerical ranges for the four DEM datasets

GDEM V3 数据误差分布最分散;数据误差大小(MAE、RMSE 和 STD)与误差分布集中性保持一致,误差分布越集中,误差越小,精度越高。

通过计算4种DEM数据绝对误差在不同坡度等级下的定量评价指标,结果如表2所示。

表2表明,ME随坡度增大呈现先减小再增加的趋势;除了ME较SRTM1 DEM大外,资源三号DEM数据在任何坡度状况下均具有最小的绝对误差值(MAE、RMSE 和 STD);对于MAE、RMSE 和 STD,AW3D30 DEM数据的误差随着坡度增大呈现先减小再增大的趋势,其他3种DEM数据的绝对误差均

随坡度增大而增大;在坡度为0~2°时,SRTM1 DEM比AW3D30 DEM的误差更小,精度更高。

4.2 相对误差对比分析

通过计算4种DEM数据的相对误差发现,其ME值在整个实验区及不同坡度等级下的分布基本全部为0.0%,故RMSE和STD的计算结果也基本相同。因此,本研究只给出相对误差在整个实验区及不同坡度等级下的MAE和RMSE数值计算结果。其中,4种DEM数据的相对误差的MAE和RMSE值计算结果如图4所示。

表2 4种DEM数据绝对误差在不同坡度等级下的ME、MAE、RMSE和STD值

Tab. 2 ME, MAE, RMSE and STD values of the absolute error for the four DEM datasets at different slope classes (m)

DEM数据	坡度/ $^{\circ}$	0~2	2~7	7~15	15~25	25~35	>35
	(控制点数量/个)	(45 259)	(37 131)	(16 301)	(37 594)	(22 065)	(23 936)
ME	资源三号DEM	1.5	1.1	0.7	1.0	1.2	1.3
	AW3D30 DEM	2.3	1.8	1.2	4.6	2.1	3.0
	SRTM1 DEM	1.1	1.0	0.1	-0.0	0.4	1.3
	ASTER GDEM V3	1.0	-0.0	-0.7	0.4	1.8	3.3
MAE	资源三号DEM	2.3	2.3	2.5	2.9	3.3	3.9
	AW3D30 DEM	3.1	2.7	2.8	3.6	4.4	5.6
	SRTM1 DEM	2.5	3.5	5.4	6.8	8.0	10.1
	ASTER GDEM V3	7.0	7.1	8.6	9.9	11.3	12.6
RMSE	资源三号DEM	3.7	3.7	4.1	4.6	6.0	5.9
	AW3D30 DEM	5.5	4.4	4.1	4.9	6.2	8.3
	SRTM1 DEM	3.8	5.5	7.6	9.2	10.9	15.4
	ASTER GDEM V3	9.5	9.7	11.4	13.0	14.9	18.4
STD	资源三号DEM	3.4	3.5	4.1	4.5	5.9	5.7
	AW3D30 DEM	5.0	4.1	3.9	4.6	5.8	7.8
	SRTM1 DEM	3.6	5.5	7.6	9.2	10.9	15.3
	ASTER GDEM V3	9.5	9.7	11.4	13.0	14.7	18.1

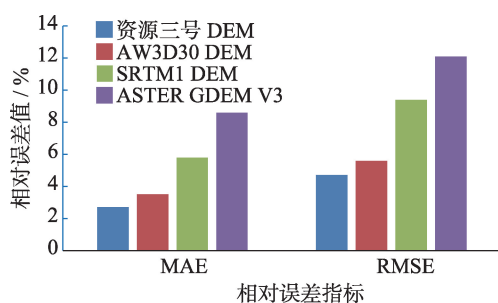


图4 4种DEM数据的相对误差计算结果

Fig. 4 Computation results of the relative error for the four DEM datasets

从图4可以看出:对应相对误差,资源三号DEM误差值最小,其次为AW3D30 DEM, SRTM1 DEM误差显著大于AW3D30 DEM, ASTER GDEM

V3数据的相对误差明显最大。

通过计算4种DEM数据相对误差在不同坡度等级下的数值,计算结果如表3所示。

表3显示:4种DEM数据的相对误差均随坡度增加而增大(除了AW3D30的RMSE值在坡度0~2°和2~7°稍有减小外);在任何坡度状况下,资源三号DEM的相对误差均最小,其次为AW3D30 DEM,然后是SRTM1 DEM, ASTER GDEM V3数据的相对误差均最大(除了在坡度0~2° AW3D30 DEM大于SRTM1 DEM之外)。

4.3 讨论

相对于以往的全球DEM数据误差对比研究,本研究的特点主要体现在以下方面:

表3 4种DEM数据相对误差在不同坡度等级下的MAE和RMSE数值

Tab. 3 MAE and RMSE values of the relative error for the four DEM datasets at different slope classes (%)

DEM数据	坡度/ $^{\circ}$ (点对数量/对)	0~2 (198 276)	2~7 (119 526)	7~15 (87 624)	15~25 (121 341)	25~35 (118 908)	>35 (80 882)
MAE	资源三号DEM	1.8	2.1	2.8	3.1	3.5	4.2
	AW3D30 DEM	2.3	2.5	3.2	3.9	4.6	6.0
	SRTM1 DEM	2.2	3.5	6.0	7.4	8.7	11.2
	ASTER GDEM V3	5.6	6.3	8.2	9.8	11.4	13.6
RMSE	资源三号DEM	3.2	3.6	4.3	5.2	5.9	6.3
	AW3D30 DEM	4.4	4.2	4.6	5.3	6.4	8.8
	SRTM1 DEM	3.5	5.8	8.6	10.1	11.9	16.3
	ASTER GDEM V3	7.7	8.7	11.1	13.0	15.0	18.5

(1)采用了高精度激光点云生成的DEM作为参考数据。以往的全球DEM数据误差对比研究多利用GPS控制点、大比例尺地形图控制点或ICE-Sat/GLAS轨道分布点你作为基准点^[16,23,25-26],基准点的分布状况对于误差评价结果具有重要意义。Tang等^[20]利用高精度激光点云生成的DEM数据对资源三号DEM数据的精度进行了逐像素的对比与评价,是少有的利用高精度DEM评价资源三号DEM精度的研究,且只评价了资源三号卫星这一种数据的精度。而在本研究中,直接利用高精度DEM数据生成100 m间隔采样的均匀分布的控制点是由于不同DEM数据空间分辨率不同,同时考虑到相对误差点对的生成(如果间隔太小误差点对则过多过密)和地形窗口分析经常采用3像元 \times 3像元的窗口,因此最终确定100 m的间隔。此间隔对于基于窗口的计算会较为合理,而基于单纯像素的分析则可能会有不利影响。

(2)进行了资源三号卫星DEM与其他全球DEM数据的误差对比。资源三号卫星数据具有更高的空间分辨率、更好的现势性和更大的全球覆盖范围,将其与其他全球DEM数据进行误差对比发现其在任何坡度状况下均具有最好的表现。张弛等^[21]在云南高海拔山区将资源三号DEM与ASTER GDEM进行的精度对比同样发现:资源三号DEM精度整体高于ASTER GDEM;同时,Dong等^[22]以资源三号DEM作为参考数据,对ASTER GDEM和SRTM DEM数据的精度进行了评价。然而,目前对资源三号DEM与已有的全球DEM数据进行精度对比与评价的研究仍然稍显匮乏,加大相关的研究将为基于资源三号卫星的全球DEM数据生产和研制提供重要依据,有力推动我国全球DEM数

据的研制工作。

(3)通过相对误差与绝对误差对比,全面分析了4种DEM数据在整个实验区及不同坡度状况下的误差分布状况。特别是利用相对误差对绝对误差的结果进行验证除了发现资源三号卫星具有最小的误差外,还指出在地表平坦地区(0~2 $^{\circ}$),SRTM1 DEM比AW3D30 DEM具有更小的误差值,即更高的精度,这在以前的研究及AW3D30 DEM的介绍中很少提及。另外,相对误差是两个控制点之间误差的差值与它们水平距离的比值,同时受平面精度的影响。因此,对于相对误差的对比分析在一定程度上也代表了平面精度对比的结果。在本研究中参考DEM数据和资源三号DEM数据空间分辨率一致,开展平面精度分析存在较大困难。在今后的精度对比分析中,应加大平面精度的对比分析。如李德仁和兰穹穹等^[27-28]分别利用高精度地面控制点同时评价了资源三号DEM数据的平面精度和高程精度。

(4)SRTM DEM数据和ASTER GDEM数据是目前应用较广泛的数据集,在本研究对比分析中误差相对较大。这可能是由于SRTM DEM来自于雷达数据,其原始采样结果就是30 m,而ASTER GDEM则源自15 m分辨率的立体相对。AW3D30数据是从5 m分辨率的DEM数据中重采的,因此精度较高,但是其存在空洞,特别是在南北纬60 $^{\circ}$ 以外。资源三号DEM数据源自分辨率最高的立体像对,但是其发射时间最晚,目前还没有免费的全球DEM数据产品,只有局部成果进行实验。另外,4种DEM数据采集时间的差异也会对误差分析结果产生影响,比如资源三号DEM与参考DEM的原始数据采集时间最为接近。

5 结论

以激光点云生成的高精度DEM数据作为参考,本研究计算了太原市及周边地区资源三号DEM及其他3种典型全球DEM数据的绝对误差和相对误差评价指标,并分析了其在不同坡度等级下的数值分布状况。通过本研究,可以获得如下结论:

(1)4种DEM数据绝对误差的平均值均大于0 m,其中SRTM1 DEM和ASTER GDEM V3数据平均误差较小,其次为资源三号DEM,AW3D30 DEM平均误差最大;4种DEM数据相对误差的平均值均为0.0%,因此相对误差的RMSE值和STD值基本相同。

(2)基于相对误差和绝对误差的MAE、RMSE和STD值说明,4种DEM数据中资源三号DEM误差最小,其次为AW3D30 DEM,然后是SRMT1 DEM,ASTER GDEM V3数据的误差最大。相对误差和绝对误差的MAE、RMSE和STD值均显示这种对比特征。

(3)在任何坡度状况下,资源三号DEM均具有最小的误差值;在坡度为0~2°时,SRMT1 DEM比AW3D30 DEM的误差更小,在其他情况下,AW3D30 DEM比SRTM1 DEM误差小,ASTER GDEM在任何坡度状况下误差都最大。

(4)资源三号DEM、SRTM1 DEM和ASTER GDEM V3数据的误差均随坡度变大而增大;AW3D30 DEM数据则呈现出随坡度变大而先减小后增大的趋势。

本研究关于资源三号卫星研制的DEM与其他全球典型免费DEM数据的误差对比分析结果需要在其他区域进行更多验证,并为其他区域的相似工作提供参考。同时,携带亚米级立体测绘相机和高精度激光测高仪的高分七号卫星于2019年11月3日在太原发射升空,我国高精度DEM数据的生产进入新时代,也为DEM数据的评价和对比分析带来新的机遇和挑战。

参考文献(References):

[1] 汤国安.我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J].地理学报,2014,69(9):1305-1325. [Tang G A. Progress of DEM and digital terrain analysis in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(9):1305-1325.]

[2] 陈加兵,李慧,陈文惠,等.基于DEM与DLG的福建省地貌形态自动分类[J].地球信息科学学报,2013,15(1):75-

80. [Chen J B, Li H, Chen W H, et al. Auto-classification of geomorphological types based on DLG and DEM for Fujian province[J]. Journal of Geo-information Science, 2013,15(1):75-80.]

[3] Wang W C, Yang X X, Yao T D. Evaluation of ASTER GDEM and SRTM and their suitability in hydraulic modelling of a glacial lake outburst flood in southeast Tibet [J]. Hydrologic Process, 2012,26(2):213-225.

[4] Moore I D, Grayson R B, Ladson A R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications[J]. Hydrological Processes, 1991,5(1):3-30.

[5] Yang L P, Meng X M, Zhang, X Q. SRTM DEM and its application advances[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011,32(14):3875-3896.

[6] Wilson J. Digital terrain modeling[J]. Geomorphology, 2012,137(1):107-121.

[7] Wang Y, Xu H, Zhang J G. High resolution bathymetry of China seas and their surroundings[J]. Chinese Science Bulletin, 2001,46(19):1661-1664.

[8] 李振洪,李鹏,丁咚,等.全球高分辨率数字高程模型研究进展与展望[J].武汉大学学报·信息科学版,2018,43(12):1927-1942. [Li Z H, Li P, Ding D, et al. Research progress of global high resolution digital elevation models[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018,43(12):1927-1942.]

[9] 高志远,谢元礼,王宁练,等.青藏高原地区3种全球DEM精度对不同地形因子的响应[J].水土保持通报,2019,39(2):184-191. [Gao Z Y, Xie Y L, Wang N L, et al. Response of three global DEM data accuracy to different terrain factors in Qinghai-Teibet Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conversation,2019,39(2):184-191.]

[10] 张玉伦,王叶堂.低山丘陵区多源数字高程模型误差分析[J].遥感技术与应用,2018,33(6):1112-1121. [Zhang Y L, Wang Y T. Accuracy assessment of the ASTER GDEM and SRTM DEM in the low mountain and hilly region[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018,33(6):1112-1121.]

[11] 杜小平,郭华东,范湘涛,等.基于ICESat/GLAS数据的中国典型区域SRTM与ASTER GDEM高程精度评价[J].地球科学·中国地质大学学报,2013,38(4):887-897. [Du X P, Guo H D, Fan X T, et al. Vertical accuracy assessment of SRTM and ASTER GDEM over Typical Regions of China Using ICESat/GLAS[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2013,38(4):887-897.]

[12] Dragut L, Eisank C. Object representations at multiple scales from digital elevation models[J]. Geomorphology, 2011,129(3-4):183-189.

- [13] Mukherjee S, Joshi P, Mukherjee S, et al. Evaluation of vertical accuracy of open source digital elevation model (DEM)[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013,21(1):205-217.
- [14] 武文娇,章诗芳,赵尚民.SRTM1 DEM 与 ASTER GDEM V2 数据的对比分析[J].*地球信息科学学报*,2017,19(8):1108-1115. [Wu W J, Zhang S F, Zhao S M. Analysis and comparison of SRTM1 DEM and ASTER GDEM V2 data[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017,19(8):1108-1115.]
- [15] 赵尚民,何维灿,王莉.DEM数据在黄土高原典型地貌区的误差分布[J].*测绘科学*,2016,41(2):67-70,102. [Zhao S M, He W C, Wang W. Error distribution analysis of SRTM3 DEM V4 data in the typical geomorphologic area of Loess Plateau[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016,41(2):67-70,102.]
- [16] Zhao S M, Cheng W M, Zhou C H, et al. Accuracy assessment of the ASTER GDEM and SRTM3 DEM: An example in the Loess Plateau and North China Plain of China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011,32(23):8081-8093.
- [17] 龚健雅,王密,杨博.高分辨率光学卫星遥感影像高精度无地面控制精确处理的理论与方法[J].*测绘学报*,2017,46(10):1255-1261. [Gong J Y, Wang M, Yang B. High-precision geometric processing theory and method of high-resolution optical remote sensing satellite imagery without GCP[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017,46(10):1255-1261.]
- [18] 潘红播,张过,唐新明,等.资源三号测绘卫星影像产品精度分析与验证[J].*测绘学报*,2013,42(5):738-744,751. [Pan H B, Zhang G, Tang X M, et al. Accuracy analysis and verification of ZY-3 product[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013,42(5):738-744,751.]
- [19] Zhou P, Tang X M, Wang Z M, et al. Vertical accuracy effect verification for satellite imagery with different GCPs [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(8):1268-1272.
- [20] Tang X M, Zhou P, Zhang G, et al. Verification of ZY-3 Satellite imagery geometric accuracy without ground control points[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015,12(10):2100-2104.
- [21] 张弛,葛莹,王冲,等.资源三号测绘卫星 DSM 与 ASTER GDEM精度对比分析——以高海拔山区为例[J].*测绘工程*,2016,25(8):29-32,37. [Zhang C, Ge Y, Wang C, et al. Accuracy comparison between ZY-3 surveying and mapping satellite DSM and ASTER GDEM[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2016,25(8):29-32,37.]
- [22] Dong Y S, Chang H C, Chen W T, et al. Accuracy assessment of GDEM, SRTM, and DLR-SRTM in Northeastern China[J]. *Geocarto International*, 2015,30(7):1-14.
- [23] Satge F, Denezine M, Pillco R, et al. Absolute and relative height-pixel accuracy of SRTM-GL1 over the South American Andean Plateau[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016,121:157-166.
- [24] 周成虎,程维明,钱金凯.数字地貌遥感解析与制图[M].北京:科学出版社,2009. [Zhou C H, Cheng W M, Qian J K. *Remote sensing interpretation and cartography to digital geomorphology*[M]. Beijing: Science Press, 2009.]
- [25] Bhang K, Schwartz F, Braun A. Verification of the vertical error in C-band SRTM DEM using ICESat and Landsat-7, Otter Tail County, MN[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007,45(1):36-44.
- [26] Carabajal C, Harding D. ICESat validation of SRTM C-band digital elevation models[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005,32(22):L22S01.
- [27] 李德仁.我国第一颗民用三线阵立体测图卫星——资源三号测绘卫星[J].*测绘学报*,2012,41(3):317-322. [Li D R. China's first civilian three-line array stereo mapping satellite: ZY-3[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012,41(3):317-322.]
- [28] 兰穹穹,郝雪涛,齐怀川.资源三号卫星影像DEM提取与精度分析[J].*遥感信息*,2015,30(3):14-18. [Lan Q Q, Hao X T, Qi H C. DEM extraction and precision analysis based on ZY-3 remote sensing data[J]. *Remote Sensing Information*, 2015,30(3):14-18.]