引文格式:雷秋佳,刘婧,曹新运.利用机载LiDAR数据的开放DEM产品精度评估[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(1):153-163.DOI:10.13203/j.whugis20220421

Citation: LEI Qiujia, LIU Jing, CAO Xinyun. Accuracy Evaluation of Open DEM Products Based on Airborne LiDAR Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(1):153-163.DOI:10.13203/j.whugis20220421

利用机载LiDAR数据的开放DEM产品精度评估

雷秋佳[1,2,3] 刘 婧[1,2,4] 曹新运[1,2,4]

1 虚拟地理环境教育部重点实验室,江苏 南京,210023

2 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,江苏 南京,210023

3 自然资源部第二海洋研究所,浙江 杭州,310012

4 南京师范大学地理科学学院,江苏 南京,210023

摘 要:数字高程模型(digital elevation model,DEM)是地学分析应用的基础数据。目前对国际上多套开放DEM产品的精度分析与比较依然有所欠缺。以机载激光雷达数据生成的高精度DEM和数字表面模型(digital surface model, DSM)为参考,以平均误差(mean error,ME)、均方根误差(root mean square error,RMSE)、90%线概率误差(linear error at 90% probability,LE90)为统计指标,评价5种开放DEM产品(ASTER、AW3D30、MERIT、SRTM和TanDEM-X 90 m)分别表达DEM和DSM时的高程精度。实验结果表明,5种产品的高程精度存在明显差异,在山地森林区域的实际精度都低于各自目标设计精度。作为DEM使用时,5种产品都对地面高程存在显著高估,其中MERIT产品(ME为2.82 m,LE90为12.19 m)和SRTM产品(ME为4.74 m,LE90为11.75 m)的精度更高,TanDEM-X产品高估最严重且精度最差(ME为10.39 m,LE90为22.83 m)。当作为DSM使用时,5种产品都对地表物体高程存在显著低估,其中TanDEM-X产品(ME为-3.69 m,LE90为16.99 m)和AW3D30产品(ME为-5.34 m,LE90为16.81 m)精度更高。误差的空间分布受地物覆盖类型影响,在森林覆盖区域比居民地区域的误差更严重。相对坡度而言,地表物体的高度对5种DEM产品的高程误差有更强影响,各产品的高程误差随着地表物体高度的增加而显著增强。

关键词:DEM;DSM;激光雷达;开放DEM产品;精度评价

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-02-15

DOI:10.13203/j.whugis20220421 **文章编号**:1671-8860(2025)01-0153-11

Accuracy Evaluation of Open DEM Products Based on Airborne LiDAR Data

LEI Qiujia[1,2,3] *LIU Jing*[1,2,4] *CAO Xinyun*[1,2,4]

1 Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing 210023, China

2 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

3 Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

4 School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

Abstract: **Objectives**: Digital elevation model (DEM) is the foundation of many geoscientific applications. Currently there are limited studies with the accuracy evaluation of various open DEM products. We aim to analyze the accuracy of five open DEM products (including ASTER, AW3D30, MERIT, SRTM, and TanDEM-X 90 m). **Methods**: The five products were compared to airborne LiDAR derived reference DEM and digital surface model (DSM) respectively. Statistical measures including mean error (ME), root mean square error (RMSE), as well as linear error at 90% probability (LE90) were used. **Results**: The results demonstrate significant differences in the accuracy among 5 open DEM products. None of them meet

基金项目:国家自然科学基金(42001284);江苏省自然科学基金(BK20200722);江苏省高等学校自然科学研究项目(20KJB420001)。

第一作者:雷秋佳,硕士,研究方向为激光雷达遥感、数字地形分析。lqj_purplejuly@126.com

通信作者:刘婧,博士,副教授。jingliugeo@njnu.edu.cn

the designed accuracy in this mountain forest study area. When used as DEM, all 5 DEM products have severe overestimation of the terrain elevation. Among them, the MERIT (ME is 2.82 m, LE90 is 12.19 m) and SRTM (ME is 4.74 m, LE90 is 11.75 m) has much higher accuracy than the other 3 products. TanDEM-X 90 m DEM has the worst accuracy (ME is 10.39 m, LE90 is 22.83 m). When used as DSM, all 5 DEM products underestimated the elevation of surface objects. Among them, the TanDEM-X 90 m (ME is −3.69 m, LE90 is 16.99 m) and AW3D30 (ME is −5.34 m, LE90 is 16.81 m) have much higher accuracy than the other 3 products. The spatial distribution of elevation errors are influenced by the type of land cover. Errors in forested areas are higher than in residential areas. Compared to slope, the height of ground objects has more impact on the elevation errors. **Conclusions**: When used as DEM, the MERIT and SRTM products have higher accuracy, while when used as DSM, the TanDEM-X 90 m and AW3D30 have higher accuracy.

Key words: DEM; DSM; LiDAR; open DEM product; accuracy evaluation

地形是指地球表面的高低起伏形态,高程是描述地表起伏形态最基本的几何量[1]。地貌演化、滑坡预警、洪水淹没、城市规划等诸多研究和应用领域,都依赖于地表高程作为基础数据支撑。数字高程模型(digital elevation model, DEM)是高程的数字化表达,通过一组有序数值阵列实现对地面地形的数字化模拟,其反映的是不包含自然及人工地物在内的“裸地”高程信息[2]。而数字表面模型(digital surface model, DSM)则是包含了地表建筑物、树木等自然及人工地物高度的模型,DSM在DEM的基础上添加了地表地物的高程信息[2]。DSM常常应用于土地利用覆盖分类[3]、建筑物高度估算[4]以及森林高度估算等研究[5]。

生产DEM产品的方法主要包括使野外地面测量、地形图数字化、立体摄影测量、合成孔径雷达干涉测量以及三维激光扫描等[1,6]。目前国际上已产生了多种免费开放的DEM产品,如美国航空航天局的航天飞机雷达地形任务(shuttle radar topography mission, SRTM)DEM、日本宇宙航空研究开发机构使用先进陆地观测卫星(advance land observing satellite, ALOS)上的全色立体遥感成像仪采集的图像生成的AW3D30、美国航空航天局的先进星载热辐射和反射辐射计(advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer, ASTER)GDEM,以及德国宇航中心发布的TanDEM-X的DEM产品[7]。ASTER和AW3D30产品都是根据光学立体摄影测量技术生产的,而SRTM和TanDEM-X的DEM产品则是应用了合成孔径雷达干涉测量技术[2]。由于测量原理的限制,AW3D30、ASTER、SRTM以及TanDEM-X等产品其实都是包含了树木和建筑物等地表物体的信息,所以这些产品更精确地是表达了地表物体的高程而非地形表面的高程(即DSM而非DEM),但是它们却常常被简化等同于DEM使用。亦有学者对已有的DEM产品进行了误差改正,例如日本Yamazaki等学者提出的去除绝对偏差、条带噪声、斑点噪声以及树高偏差后得到改进的DEM产品(multi-error-removed improved-terrain DEM, MERIT DEM)[8]。以上5种产品都具有全球或者接近全球可用性,被广泛地应用于全球变化[9]、水文模拟[10]、地质与灾害评估[11]、工程勘测[12]等各个领域。

随着开放DEM产品的蓬勃发展,各个产品的精度情况、误差分布以及适用条件越来越受学界关注。由于不同DEM产品包含不同程度的高程误差,因此这些产品作为参数被纳入到后续应用模型时会造成模拟分析的结果误差。例如,文献[13]在评估海平面上升对沿海城市淹没风险的研究中,发现使用SRTM、MERIT、TanDEM-X的产品分别进行淹没模拟时,所得到的越南风险区域面积相差50%以上。文献[14]利用ASTER和SRTM的产品对印度尼西亚进行海啸淹没模拟研究,发现使用ASTER和SRTM开发的海啸淹没模型会低估淹没程度,不宜用于水动力模型评估海啸淹没区。赵冠华等学者在研究气温数据的空间插值时,发现温度插值的误差受到DEM产品高程误差的影响,在中国西南地区,基于SRTM产品的温度插值结果优于基于ASTER产品的温度插值结果[15]。

目前已有的开放DEM产品精度评估研究,主要依靠地面高程测量、星载激光测高以及机载激光扫描3种不同的参考数据。其中,地面高程测量是最为精确的获取参考点高程的方法,常常被用来评价DEM产品的精度。例如文献[16]使用GPS测量作为参考数据对TanDEM-X的

DEM产品进行了精度评估。文献[17]使用差分GPS获取高程点的坐标,评估了SRTM产品在美国密西根东南部地区的数据精度,发现在该区域总体标准偏差为3.3 m,精度难以满足裸露地表的误差标准[17]。星载激光测高仪由于具有很高的测高精度,获取的地面高程也常常用来作为DEM产品精度评价的参考数据。例如文献[18]选择中国典型高海拔山地和低海拔沿海平原为实验区,参考冰、云和陆地高程卫星的地球科学激光测高系统(geoscience laser altimeter system,GLAS)测高数据评价了SRTM和ASTER产品的精度,发现两种产品在西南山地的精度远低于在平原区域的精度。文献[19]参考GLAS测高数据,评价了资源三号DSM产品精度,发现其均方根误差在5 m以内。文献[20]基于GLAS测高数据,评价了TanDEM-X 90 m的DEM产品在中国大陆地区的误差空间分布特征,发现该产品在中国区域整体的绝对误差均值为3.89 m,中误差为9.03 m,且误差随着坡度的上升逐渐增大[20]。

参考地面高程测量和星载激光测高数据进行精度评价时,都是点对点的评价,而使用机载激光雷达(light detection and ranging,LiDAR)来评价DEM产品精度时,能够获取面状的数据,有利于分析误差的空间分布结构。LiDAR是近数十年来摄影测量与遥感领域极具革命性的技术之一。它通过主动发射激光脉冲获得地面高密度的三维点云,之后通过多次回波滤波、分类与建模可以同时得到区域的DSM和DEM[1]。机载LiDAR技术突破了单点测量,变为连续自动数据获取,提高了观测速度与效率[21]。文献[22]使用机载LiDAR数据生成的DSM作为参考,研究发现与AW3D30、ASTER和SRTM产品相比,TanDEM-X产品的高程精度更高[22]。文献[23]使用墨西哥局部区域的机载激光扫描数据生成的参考DSM,评价了多种开放DEM产品在表征地表物体高程时的精度,结果表明AW3D30产品的精度优于SRTM和ASTER的产品。文献[24]基于机载LiDAR数据,评价了高寒山区的DEM产品精度,发现SRTM产品的均方根误差(root mean square error,RMSE)为7.62 m,略微优于RMSE为9.90 m的ASTER产品。文献[25]以位于捷克共和国的Krkonose山脉等为研究对象,分别参考机载LiDAR生成的DEM和DSM产品,评价了TanDEM-X的DEM产品精度,研究发现,以DEM产品作为参考时,TanDEM-X呈现出显著高估,在森林和非森林之间的区域平均误差差异很大,而以DSM产品为参考时,则表现为微弱低估。

在已有研究中,分析不同开放DEM产品分别表征地形表面高程以及地表物体高程时的精度优劣、误差空间分布结构的研究还很缺少。因此,本文旨在研究以机载LiDAR获取的高精度DEM和DSM为参考,对ASTER、AW3D30、MERIT、SRTM和TanDEM-X这5种开放全球DEM产品进行高程精度评价与误差分析。

1　研究区与数据

1.1　研究区域

选取美国国家生态观测网络(National Ecological Observatory Network,NEON)的史密森尼学会生物保护研究所(Smithsonian Conservation Biology Institute,SCBI)实验站为研究区(如图1所示)。SCBI实验站位于美国弗吉尼亚州蓝岭山脉山脚下(78.06°W—78.16°W,38.08°N—38.93°N),气候温热湿润,年平均气温为11.6 ℃,年均降水量1 125 mm。区域内地面高程起伏在251～571 m,土地覆盖类型主要包括森林、居民地,以及少量的农田和草坪。森林植被以落叶阔叶林为主,平均冠层高度约35 m,主要树种为橡树、山核桃、白蜡木和郁金香杨树。



图1　美国史密森尼学会生物保护研究所实验站

Fig. 1　The Study Area of SCBI

1.2　数据介绍

1.2.1　机载LiDAR数据

研究区域的机载LiDAR数据可以从NEON官网数据中心下载得到。该数据由NEON的航空观测平台搭载RIEGL的LMS Q780激光雷达系统于2019年6月采集,飞行高度约1 000 m,激

光发散角0.25 mrad,点云密度约16.5点/m^2。本文直接使用NEON数据中心对点云数据进行处理后提供的DEM与DSM产品[26]。根据数据质量控制报告,其空间分辨率为1 m,垂直精度约0.15 m,水平定位精度约0.3 m,坐标系统是WGS_1984_UTM投影坐标系,垂直基准为NAVD88。本文根据DSM减去DEM生成归一化DSM(normalized DSM,nDSM)如图2所示,结合图1实验区的遥感影像可知,区域西南部和东北部主要由高度较高的森林冠层覆盖(约20~40 m),西北角可见高度较矮的居民住宅区(约0~10 m),中部和东南角可见零星分布的住宅、农田和草坪。实验区的坡度起伏如图3所示,可以观察到大部分区域的坡度在20°以下。

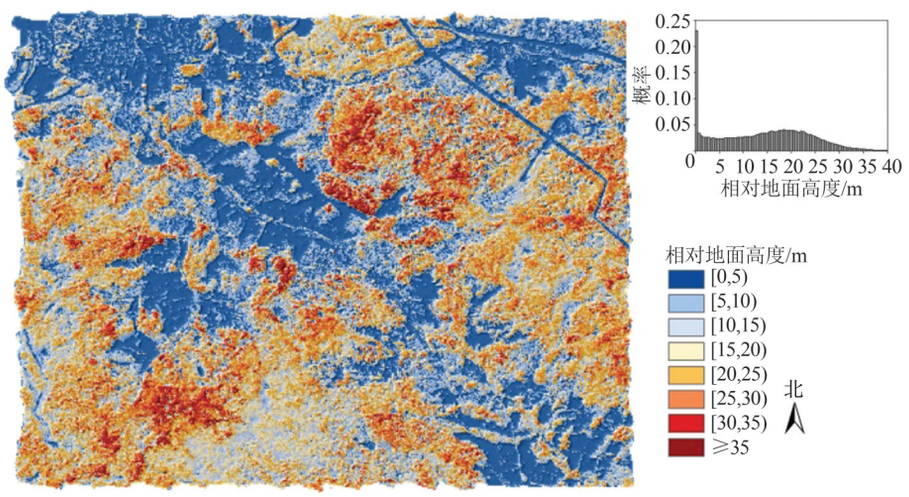


图2 基于机载DSM和DEM生成的nDSM产品

Fig. 2 nDSM Product Generated by Airborne LiDAR Derived DSM and DEM

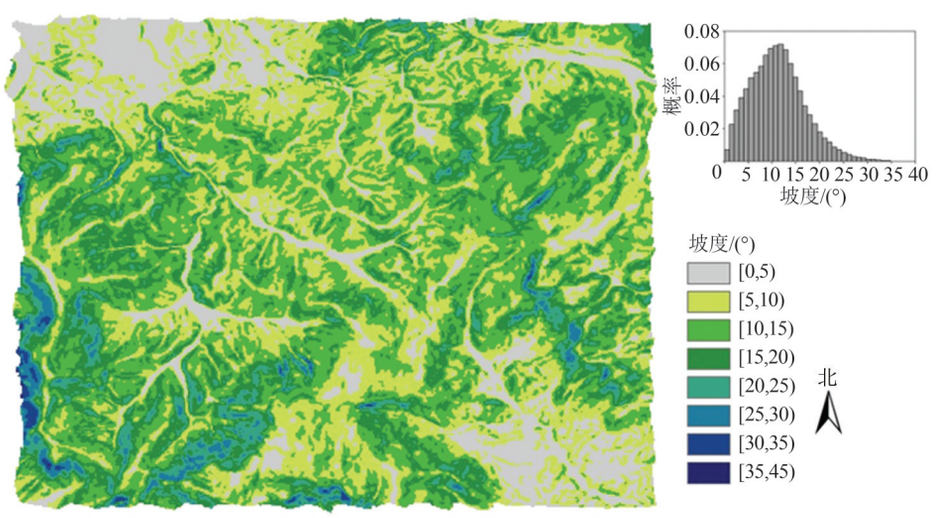


图3 研究区域的坡度分布

Fig. 3 Spatial Distribution of Slope in the Study Area

1.2.2 开放DEM产品数据

选取ASTER、AW3D30、MERIT、SRTM和TanDEM-X共5种开放DEM产品进行精度比较和误差分析。其中,ASTER的DEM产品是根据ASTER获得的立体像对生成,空间分辨率为30 m,垂直方向精度为13 m,数据产品可从https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv003/下载。AW3D30是由日本宇宙航空研究开发机构提供的,可以从http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm下载得到,空间分辨率为30 m,高程精度为5 m[27]。MERIT产品去除了绝对偏差、条带噪声、斑点噪声,并进行了树高偏差改正,可从http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_DEM下载,其空间分辨率为90 m,高程精度为5 m。SRTM的DEM产品版本为SRTMGL1v003,可以从美国地质勘探局网站下载(https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl1v003/),其空间分辨率为30 m。TanDEM-X

是德国航宇中心的雷达地球观测任务,其 90 m 分辨率的 DEM 产品可从 https://download.geoservice.dlr.de/TDM90/网址下载。各产品的参数汇总[28]如表 1 所示。

表 1　5 种全球开放 DEM 产品具体参数

Table 1　Specific Parameters of 5 Global Open DEM Products

DEM 产品	水平基准	垂直基准	空间分辨率/m	高程精度/m	版本	数据获取时间
ASTER	GCS_WGS_1984	EGM96	30	13	v003	1999—2008 年
AW3D30	GCS_WGS_1984	EGM96	30	5	v3.1	2006—2011 年
MERIT	GCS_WGS_1984	EGM96	90	5	v1.0.3	1987—2017 年
SRTM	GCS_WGS_1984	EGM96	30	10	GL1 v003	1999—2000 年
TanDEM-X	GCS_WGS_1984	WGS84	90	10	v01	2011—2015 年

2　研究方法

2.1　坐标转换、重采样及区域裁剪

实验中,研究参考的机载 LiDAR 生成的 DEM 和 DSM 产品的平面基准是 WGS_1984_UTM_17N 投影坐标系,垂直基准是 NAVD88 系统,空间分辨率为 1 m,而 5 种开放 DEM 产品的具体参数如表 1 所示,因此,后续分析中,统一选择 WGS_1984_UTM_17N 为水平基准,EGM96 为垂直基准,空间分辨率为 1 m。首先,使用 GDAL 命令行工具将机载 LiDAR 生成的 DEM 和 DSM 产品以及 TanDEM-X 的 DEM 产品的垂直基准转换为 EGM96 系统。GDAL 是一个开源栅格空间数据转换库,是诸如 QGIS 等地理信息系统软件的核心组成之一,广泛应用于空间数据处理。然后,使用 ArcGIS 软件统一将 ASTER、AW3D30、MERIT、SRTM 以及 TanDEM-X 5 种产品从地理坐标系 GCS_WGS_1984 转换到平面投影坐标系 WGS_1984_UTM_17N,空间分辨率统一为 1 m。由于实验使用的 5 种开放 DEM 产品数据所囊括的区域范围都远大于机载 LiDAR 数据覆盖的范围,所以以机载 LiDAR 数据的范围为输入,按掩膜提取的方法对 DEM 产品影像数据进行了区域裁剪。

2.2　误差分析及精度评价

对开放 DEM 产品的误差分析主要关注其高程精度,通过统计分析、误差直方图和误差空间结构分析 3 个方面进行。首先,通过逐像素比较 ASTER、AW3D30、MERIT、SRTM 和 TanDEM-X 5 种产品和机载参考 DEM 以及机载参考 DSM 产品,计算出 5 种产品分别表征 DEM 和 DSM 时的高程误差,计算公式为:

$$\Delta h_j = h_j - h_{\mathrm{ref}} \tag{1}$$

式中,Δh_j 是第 j 个像素的高程误差;h_j 是第 j 个像素的待评估 DEM 产品的高程值;h_{ref} 为第 j 个像素的参考 DEM 或 DSM 产品的高程值。之后选取平均误差(mean error,ME)、RMSE,以及 90% 线概率误差(linear error at 90% probability,LE90)3 个统计指标[1]来定量评估各产品精度。ME 可以反映 5 种 DEM 产品高程误差的整体趋势[20],ME 与 0 的偏差可以指示开放 DEM 产品对地形的表达存在高估或低估。RMSE 用来衡量观测值同真值之间的偏差,它可以排除误差值正负号的干扰,反映观测值精度的可靠性。此外,考虑到高程误差有时受到异常值的影响,以及可能存在系统偏差而呈现非正态分布,因此本文根据前人研究建议,选择了具有稳健性的统计指标 LE90,来定量比较不同 DEM 产品之间的精度[1,29]。ME、RMSE 以及 LE90 的计算公式为:

$$M = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta h_j \tag{2}$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}{\Delta h_j}^2} \tag{3}$$

$$L = \hat{Q}_{|\Delta h|}(0.9) \tag{4}$$

式中,M、R、L 分别表示 ME、RMSE、LE90 的值;$\hat{Q}_{|\Delta h|}(0.9)$ 表示将所有像素的高程误差绝对值(即 $|\Delta h|$)从小到大排序后,取 90% 分位数的值。误差直方图是对高程差值的统计结果的直观展示,在计算出逐像素高程误差的基础上,分析误差的频率直方图并辅助拟合曲线,评估 5 种开放 DEM 产品的误差是否符合正态分布。此外,由于使用机载激光扫描最大的优势是能提供面状的数据,所以本文制作了误差的空间分布图,结合研究区的坡度图以及归一化数字表面模型,定量分析高程误差随着坡度以及地表物体高度的变化规律。

3 结果分析与讨论

3.1 高程误差直方图及统计分析结果

当以机载LiDAR生成的DEM为参考真值时,5种开放DEM产品的误差频率分布直方图如图4所示。结果显示5种产品中,ASTER、MERIT和SRTM的误差近似呈现正态分布,而AW3D30的误差呈现明显的右偏态分布,TanDEM-X产品则呈现微弱双峰的误差分布。相对参考的地形表面,5种DEM产品都存在明显的正方向偏移,并且以MERIT产品的偏移程度最小(ME为2.82 m),TanDEM-X产品的正向偏移程度最大(ME为10.39 m)。这表明5种开放DEM产品对实验区域的地面高程值都存在明显高估,并且MERIT的高估程度最小,TanDEM-X的高估程度最大。MERIT的曲线分布最为狭窄且陡峭,这是由于MERIT的DEM产品去除了树高,并未出现整体的显著高估现象(图4(c))。5种开放DEM产品中,AW3D30产品相对ASTER和SRTM而言,RMSE和LE90误差都更大,这一发现与文献[28]的结论不一致。文献[28]对比研究AW3D30、SRTM和ASTER这3种DEM产品,得出AW3D30产品的高程精度最高。这种差异很可能是由于文献[28]的精度评价中,使用的参考DEM数据是TanDEM-X的12 m分辨率DEM产品,而本文使用的是机载LiDAR生成的DEM产品。本文与文献[30]发现TanDEM-X产品的精度低于AW3D30产品的结论相同,SRTM产品相对ASTER产品表征DEM的精度更高,这与文献[31-32]的研究发现一致。值得注意的是,5种开放DEM产品中只有MERIT和SRTM表征DEM时,LE90是小于15 m的。

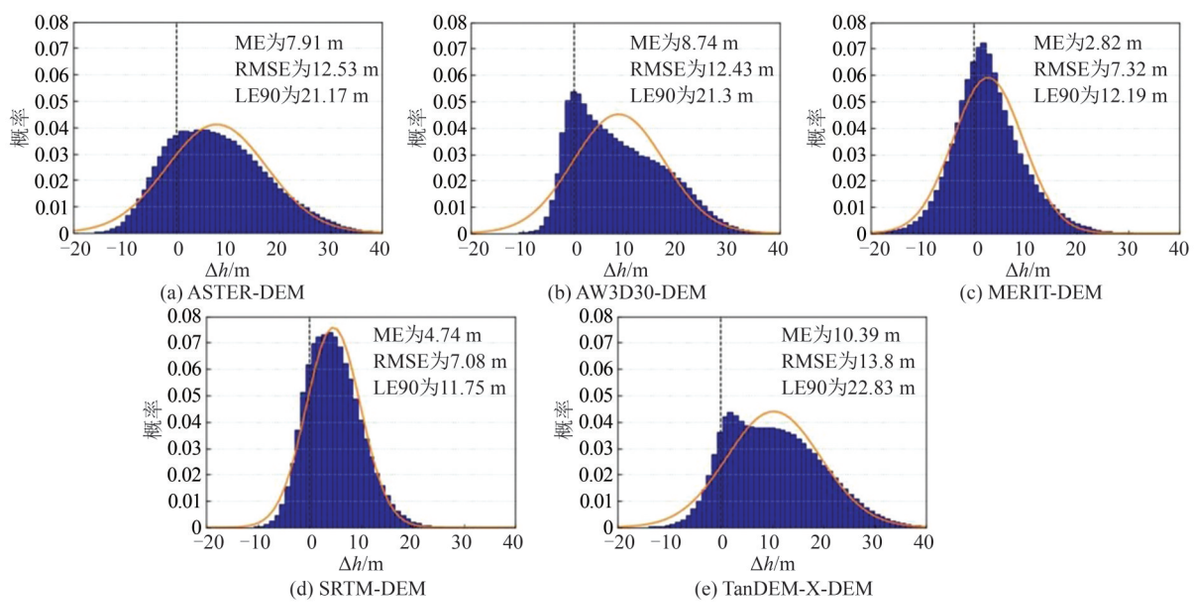


图4 5种开放DEM产品的高程误差频率直方图(以机载DEM为参考真值)

Fig. 4 Frequency Histogram of Elevation Errors of 5 Open DEM Products (Airborne DEM as Reference)

当以机载LiDAR生成的DSM为参考真值时,5种开放DEM产品的误差频率直方图如图5所示。5种产品与参考机载DSM之间均存在着明显的负方向偏移,表明它们对地表物体的高程都存在低估。并且其中MERIT产品对地表高程的低估程度最高(ME为−11.26 m),这是由于MERIT校正了树高导致,所以其ME绝对值最大、低估现象最为明显,而且由于MERIT产品只校正了树高,没有校正建筑物的高度,所以呈现了双峰分布的现象。此外,5种产品中,TanDEM-X产品的ME绝对值最小,对地表物体表面高程的低估现象最小,这可能是由于其数据采集时间距离实验区机载LiDAR参考数据采集时间2019年最近,所以地表的相对变化概率更小。此外,TanDEM-X产品与AW3D30产品的误差也显著低于其他3种产品,这表明TanDEM-X和AW3D30比其他产品表征DSM的效果更好。SRTM比ASTER和AW3D30的效果更差,可能是由于SRTM的采集时间在2000年,相距数据采集的2019年最为久远,所以误差更大。

所有误差统计指标如表2所示,对比表1可以发现5种产品在本文研究区的实际精度都低于各产品的目标设计精度。参考机载DEM时,MERIT产品的ME最小,SRTM产品的RMSE

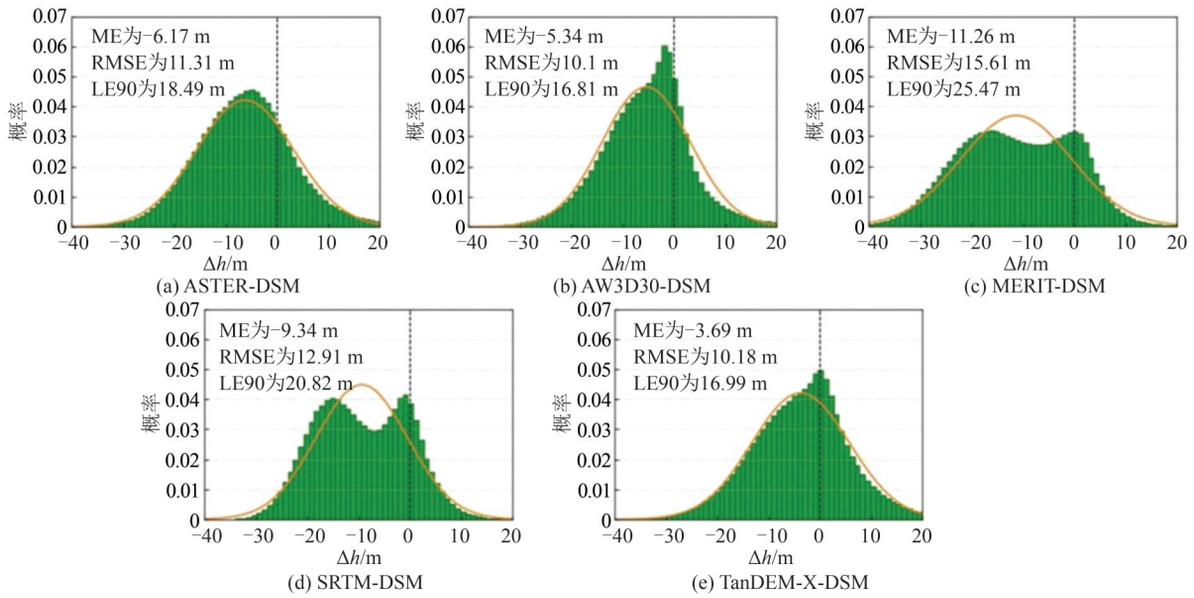


图 5　5 种开放 DEM 产品的高程误差频率直方图（以机载 DSM 为参考真值）

Fig. 5　Frequency Histogram of Elevation Errors of 5 Open DEM Products (Airborne DSM as Reference)

以及 LE90 最小，TanDEM-X 产品的 3 项误差值都最大，这表明 5 种产品作为 DEM 使用时，MERIT 和 SRTM 精度更高，而 TanDEM-X 精度最低。参考机载 DSM 时，TanDEM-X 产品的 ME 绝对值最小，AW3D30 产品的 RMSE 和 LE90 最小，MERIT 产品的 3 项误差值最大，这表明 5 种产品作为 DSM 使用时，TanDEM-X 和 AW3D30 精度更高，而 MERIT 精度最低。类似地，文献[22]发现以机载 LiDAR 生成的 DSM 为参考时，TanDEM-X 产品的精度始终优于 SRTM 和 ASTER 产品[22]。

表 2　各开放 DEM 产品的高程误差统计表/m

Table 2　Error Statistics of Each Open DEM Product/m

DEM 产品	参考机载 DEM			参考机载 DSM		
	ME	RMSE	LE90	ME	RMSE	LE90
ASTER	7.91	12.53	21.17	−6.17	11.31	18.49
AW3D30	8.74	12.43	21.30	−5.34	10.10	16.81
MERIT	2.82	7.32	12.19	−11.26	15.61	25.47
SRTM	4.74	7.08	11.75	−9.34	12.91	20.82
TanDEM-X	10.39	13.80	22.83	−3.69	10.18	16.99

另外，根据表 2 还可以发现，ASTER 和 AW3D30 两种产品在表示 DSM 时，比表示 DEM 时的 RMSE 更小（ASTER：11.31 m＜12.53 m；AW3D30：10.1 m＜12.43 m），相应的 LE90 也更小（ASTER：18.49 m＜21.17 m；AW3D30：16.81 m＜21.30 m）。这是由于 ASTER 和 AW3D30 的测高原理都是三维立体像对测量，所以更适合表达 DSM。

3.2　高程误差的空间分布

参考机载 DEM 时，5 种开放 DEM 产品的高程误差空间分布如图 6 所示。对比分析可知，TanDEM-X 产品中大部分像素呈现红色，表示高估了地形表面的高程。而 ASTER 产品中，误差大于 15 m 以及小于或等于 −15 m 的像素都很多，表明既有显著低估区域也有显著高估区域。对比图 2 的 nDSM 和图 1 研究区遥感影像，可知 ASTER、AW3D30 以及 TanDEM-X 的 DEM 产品都是显著高估了森林覆盖区域的地面高程（＞15 m），而 MERIT 产品由于校正了树高，所以在这一范围内误差较低（≤15 m）。文献[33]也发现在森林覆盖区域，MERIT 表征地形表面高程的精度优于 SRTM 和 TanDEM-X 产品[33]。SRTM 由于采集时间在 20 年前，很可能由于植被的生长，且雷达具有一定的穿透森林冠层能力，而光学影像不具备，所以其高估现象不如 ASTER、AW3D30、TanDEM-X 产品显著。此外，在研究区西北角的居民地覆盖区域，MERIT、SRTM 和 TanDEM-X 产品对地面高程的高估现象都不严重（＜5 m），这表明误差的空间分布结构受到了土地覆盖类型的影响。

参考机载 DSM 时，5 种开放 DEM 产品的高程误差空间分布如图 7 所示。与图 6 的情况相反，5 种产品在表征地表物体高程时，大部分区域都呈现出低估现象（蓝色像素比例高）。此时，MERIT 的低估现象最为严重，在森林区域呈现显著低估，在研究区西北角和东南角的居民地区

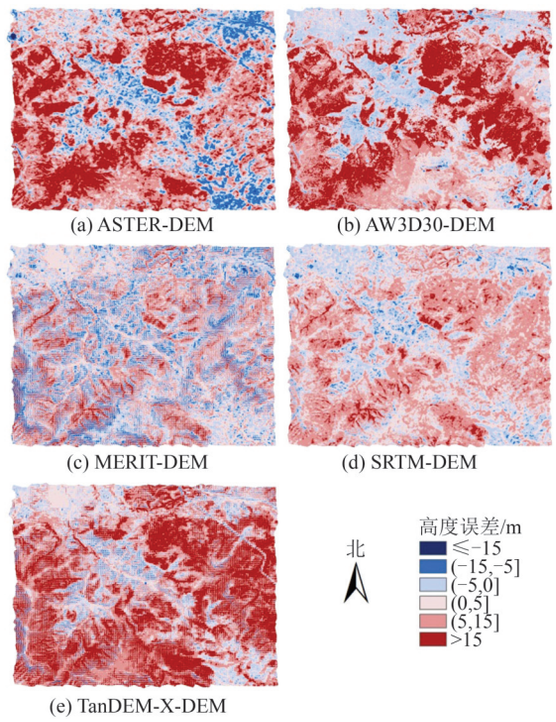


图6 以机载DEM数据为参考真值时5种DEM数据的高程误差空间分布图

Fig. 6 Spatial Distribution of Elevation Errors for Each Open DEM Product (Airborne DEM as Reference)

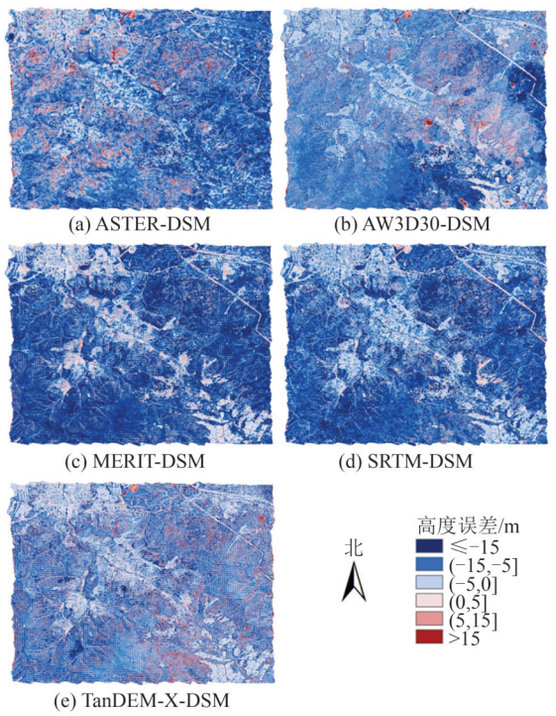


图7 以机载DSM数据为参考真值时5种DEM数据的高程误差空间分布图

Fig. 7 Spatial Distribution of Elevation Errors for Each Open DEM Product (Airborne DSM as Reference)

域,则呈现较为微弱的误差(浅粉色和浅蓝色)。TanDEM-X产品在森林覆盖区域比居民地区域的低估更为严重。SRTM相对ASTER、AW3D30产品的低估现象更严重,应该是由于其数据采集时间最为久远,所以由于植被生长造成了更严重的低估误差。

3.3 高程误差随地形坡度及地表物体高度的变化

本文进一步定量分析了高程误差随地表物体高度和坡度的变化规律。由图8可知,在表征地形表面高程时,随着地表物体高度的增加,5种DEM产品对地面高程的高估程度都在增加(如图8(a)显示ME递增),且RMSE也在增大(如图8(b)显示RMSE递增),其中MERIT产品的ME在每个高度范围内都是最小的,0~20 m范围内,MERIT产品的RSME最小,大于20 m后SRTM产品的RMSE最小。相对而言,坡度对DEM精度的影响不如地表物体高度的影响大。随着坡度增加,5种DEM产品的高估程度都呈现先增加后减少的趋势(如图8(c)显示ME先递增后递减),且RMSE也是先增大后减小(见图8(d)),在坡度约20°处高估程度最高。对比以往研究,文献[30]在分析TanDEM-X产品在中国区域的误差规律时发现,随着坡度从0°到50°增加,TanDEM-X产品的RMSE呈现出明显增大的趋势;文献[34]发现在山西省中部,SRTM和ASTER的DEM产品的RMSE随着坡度增大一直呈增大趋势;文献[24]在青藏高原东北缘,发现当坡度从0°增长到5°时,SRTM和ASTER的DEM产品的RMSE微弱降低,而随着坡度从5°增长到30°,RMSE逐渐增大。就整体趋势而言,本文和前人研究都发现坡度会制约DEM产品的精度,但是具体的变化规律有所差异,主要原因是本文实验区和前人研究实验区的地形复杂度和地表覆盖类型有所不同。由图3可知,本文研究区内坡度超过20°的区域占比很小,未来实验中可以探索坡度起伏更大的区域下不同DEM产品的精度。

在表征DSM时,据图9可知随着地表物体高度的增加,5种产品对地表物体高程的低估程度都在增强(如图9(a)显示ME递减),而且误差也在增加(如图9(b)显示RMSE递增)。TanDEM-X产品的ME绝对值在0~25 m高度范围内是最小的,表示其低估程度最弱。随着地面坡度的增加,5种产品对地表物体高程的低估程度都呈现先增大后减小的趋势(如图9(c)显示ME先递减后递增),误差也呈现先增大后减小的趋势(如图9(d)显示RMSE先递增后递减)。5种产品中,由于MERIT校正了树高,在每个坡度区间其误差都是最大的。

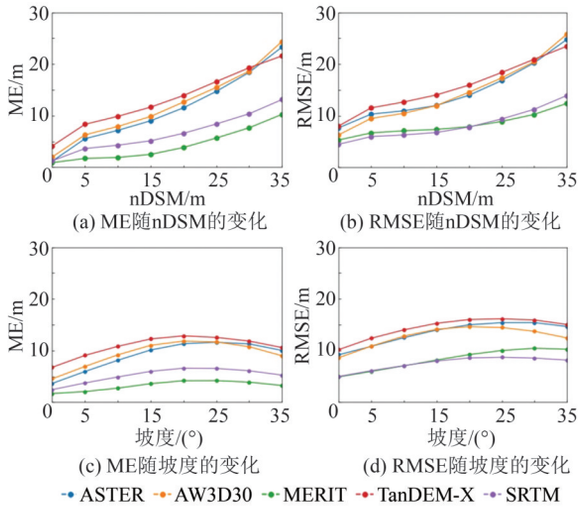


图 8　5种开放 DEM 产品参考机载 DEM 时的 ME 和 RMSE 随 nDSM 和坡度的变化

Fig. 8　Change of ME and RMSE with nDSM and Slope for 5 Open DEM Products (Airborne DEM as Reference)

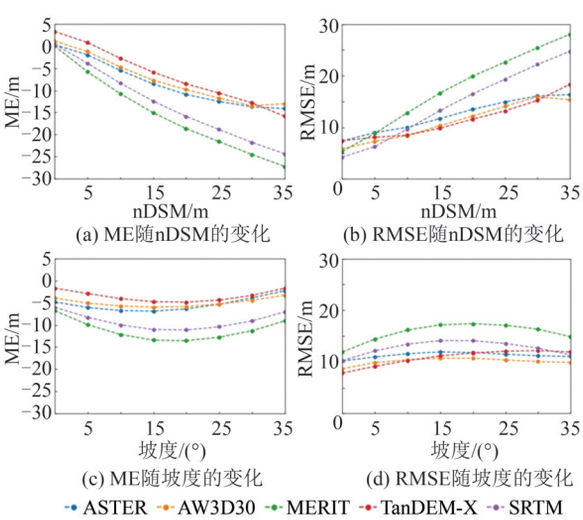


图 9　5种开放 DEM 产品参考机载 DSM 时的 ME 和 RMSE 随 nDSM 和坡度的变化

Fig. 9　Change of ME and RMSE with nDSM and Slope for 5 Open DEM Products (Airborne DSM as Reference)

4　结　语

本文以机载 LiDAR 数据生成的高精度 DEM 和 DSM 作为参考真值，对比分析了 5 种常用的全球开放 DEM 产品，包括 ASTER (v003)、AW3D30 (v3.1)、MERIT (v1.0.3)、SRTM (GL1 v003) 以及 TanDEM-X (90 m, v01) 分别表征 DEM 和 DSM 时的高程误差。以美国史密森尼学会生物保护研究所实验站为研究区，统计 5 种开放 DEM 产品与参考高程真值之间的 ME、RMSE、LE90，并分析误差频率直方图、误差空间分布，以及误差随地表物体高度和坡度的变化，进行了不同产品的精度评估比较研究。实验结果表明：

1) 5 种开放 DEM 产品的高程精度存在明显差异，在本文研究区的实际精度都低于各自产品的目标设计精度。

2) 当作为 DEM 使用时，5 种产品都存在显著高估。MERIT (ME 为 2.82 m，LE90 为 12.19 m) 和 SRTM (ME 为 4.74 m，LE90 为 11.75 m) 精度更高，TanDEM-X 精度最低 (ME 为 10.39 m，LE90 为 22.83 m)。MERIT 产品对地面高程的低估程度最低。

3) 当作为 DSM 使用时，5 种产品都存在显著低估。TanDEM-X (ME 为 −3.69 m，LE90 为 16.99 m) 和 AW3D30 (ME 为 −5.34 m，LE90 为 16.81 m) 的精度更高，MERIT 的精度最低 (ME 为 −11.26 m，LE90 为 25.47 m)。TanDEM-X 的产品对地表物体高程的低估程度最弱。

4) 误差的空间分布结构受到土地覆盖类型的影响。作为 DEM 使用时，ASTER、AW3D30 以及 TanDEM-X 都显著高估了森林覆盖区域的地面高程 (>15 m)，作为 DSM 使用时，TanDEM-X 产品在森林覆盖区域比在居民地区域的高程低估现象更为严重。

5) 地表物体的高度对 5 种 DEM 产品的高程误差有强烈影响。不论作为 DEM 或者 DSM 使用，5 种 DEM 产品的 RMSE 和 LE90 误差都随着地表物体高度的增加，而呈显著增大的趋势。相对而言，坡度因素对 5 种产品的误差影响不如地表物体的高度显著。

本文充分利用了机载 LiDAR 数据，分析了开放 DEM 产品分别表征地形表面高程和地表物体高程时的精度高低与误差规律，根据实验结果推荐表征地形高程时使用 MERIT 或者 SRTM 产品，表征地表物体高程时使用 TanDEM-X 产品。本文的结论可以为今后在类似土地覆盖类型与地形起伏区域的研究中 DEM 产品的选择提供参考。

参　考　文　献

[1] 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 Zhenhong，LI Peng，DING Dong，et al. Research Progress of Global High Resolution Digital Elevation Models [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2018，43(12)：1927-

1942.

[2] 唐新明,李世金,李涛,等. 全球数字高程产品概述[J]. 遥感学报,2021, 25(1): 167-181.
TANG Xinming, LI Shijin, LI Tao, et al. Review on Global Digital Elevation Products[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2021, 25(1): 167-181.

[3] CHEPKEMBOI L E. Developing a Digital Surface Model of Urban Land Use Transformation in Upper Hill, Nairobi, Kenya [D]. Nairobi: University of Nairobi, 2019.

[4] HUANG H, CHEN P, XU X, et al. Estimating Building Height in China from ALOS AW3D30[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 185: 146-157.

[5] GUTH P, NIEKERK A, GROHMANN C, et al. Digital Elevation Models: Terminology and Definitions [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13: 3581.

[6] 潘正风,程效军,成枢,等. 数字地形测量学[M]. 武汉:武汉大学出版社,2015.
PAN Zhengfeng, CHENG Xiaojun, CHENG Shu, et al. Digital Topographic Surveying [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2015.

[7] RIZZOLI P, MARTONE M, GONZALEZ C, et al. Generation and Performance Assessment of the Global TanDEM-X Digital Elevation Model [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 132: 119-139.

[8] YAMAZAKI D, IKESHIMA D, TAWATARI R, et al. A High-Accuracy Map of Global Terrain Elevations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(11): 5844-5853.

[9] 邓晨晖,白红英,高山,等. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应[J]. 自然资源学报,2018, 33(3): 425-438.
DENG Chenhui, BAI Hongying, GAO Shan, et al. Spatial-Temporal Variation of the Vegetation Coverage in Qinling Mountains and Its Dual Response to Cimate Change and Human Activities [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(3): 425-438.

[10] 黄泽群,李超群,吴欢,等. 基于MERIT DEM和DRT升尺度化算法的多分辨率全国河网数据集构建[J]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(3): 1-9.
HUANG Zequn, LI Chaoqun, WU Huan, et al. A National Multi-resolution River Network Database Based on MERIT DEM and DRT Upscaling Algorithm [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2020, 36(3): 1-9.

[11] 郭芳芳, 杨农, 孟晖, 等. 地形起伏度和坡度分析在区域滑坡灾害评价中的应用[J]. 中国地质, 2008, 35(1): 131-143.
GUO Fangfang, YANG Nong, MENG Hui, et al. Application of the Relief Amplitude and Slope Analysis to Regional Landslide Hazard Assessments [J]. *Geology in China* , 2008, 35(1): 131-143.

[12] 黄培之. 地面数字高程模型的应用开发[J]. 测绘地理信息, 1990, 26(2): 24-28.
HUANG Peizhi. Application and Development of Ground Digital Elevation Model [J]. *Journal of Geomatics*, 2019, 45(3): 16-19.

[13] HOOIJER A, VERNIMMEN R. Global LiDAR Land Elevation Data Reveal Greatest Sea-Level Rise Vulnerability in the Tropics [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 3592.

[14] GRIFFIN J, LATIEF H, KONGKO W, et al. An Evaluation of Onshore Digital Elevation Models for Modeling Tsunami Inundation Zones [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2015, 3: 32.

[15] 赵冠华, 刘正佳, 胡云锋, 等. DEM的不确定性对温度插值精度的影响[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(2): 21-26.
ZHAO Guanhua, LIU Zhengjia, HU Yunfeng, et al. Impacts of DEM Uncertainty on Temperature Interpolation Accuracy[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2016, 32(2): 21-26.

[16] WESSEL B, HUBER M, WOHLFART C, et al. Accuracy Assessment of the global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS Data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 139: 171-182.

[17] BROWN C, SARABANDI K, PIERCE L. Validation of the Shuttle Radar Topography Mission Height Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(8): 1707-1715.

[18] 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, 2013, 38(4): 887-897.
DU Xiaoping, GUO Huadong, FAN Xiangtao, et al. Vertical Accuracy Assessment of SRTM and ASTER GDEM over Typical Regions of China Using ICESat/GLAS [J]. *Earth Science*, 2013, 38(4): 887-897.

[19] LI G, TANG X, YUAN X, et al. Vertical Accuracy Assessment of ZY-3 Digital Surface Model Using ICESat/GLAS Laser Altimeter Data [J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, 42(1): 23-28.

[20] 孙亚飞, 江利明, 柳林, 等. TanDEM-X双站In-

SAR地形提取及精度评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(1): 100-105.
SUN Yafei, JIANG Liming, LIU Lin, et al. Generating and Evaluating Digital Terrain Model with TanDEM-X Bistatic SAR Interferometry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1): 100-105.

[21] 李清泉, 李必军,陈静. 激光雷达测量技术及其应用研究[J]. 武汉测绘科技大学学报,2000, 25(5): 387-392.
LI Qingquan, LI Bijun, CHEN Jing. Research on Laser Range Scanning and Its Application [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 2000, 25(5): 387-392.

[22] VASSILAKI D, STAMOS A. TanDEM-X DEM: Comparative Performance Review Employing LIDAR Data and DSMs [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 160: 33-50.

[23] CARRERA-HERNANDEZ J. Not All DEMs Are Equal: An Evaluation of Six Globally Available 30 m Resolution DEMs with Geodetic Benchmarks and LiDAR in Mexico [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 261: 112474.

[24] 张欢,李弘毅,李浩杰,等. 基于机载LiDAR的高寒山区遥感高程数据精度评估[J]. 遥感技术与应用, 2021,36(6): 1311-1320.
ZHANG Huan,LI Hongyi,LI Haojie,et al. Accuracy Evaluation of Remote Sensing Elevation Data in Alpine Mountains Based on Airborne LiDAR [J]. *Remote Sensing Technology and Application*,2021, 36(6): 1311-1320.

[25] GDULOVA K, MARESOVA J, MOUDRY V. Accuracy Assessment of the Global TanDEM-X Digital Elevation Model in a Mountain Environment [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 241: 111724.

[26] National Ecological Observatory. Elevation - LiDAR[R]. Network, USA: National Ecological Observatory, 2020.

[27] TAKAKU J, TADONO T, TSUTSUI K, et al. Validation of "AW3D" Global DSM Generated from ALOS Prism[J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, Ⅲ-4: 25-31.

[28] 管李义,陈斯飏,邹思远,等. 几种全球开放DEM数据集的对比分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(10): 21-23.
GUAN Liyi, CHEN Siyang, ZOU Siyuan, et al. Comparative Analysis of Several Freely Available DEM Dataset[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2020, 43(10): 21-23.

[29] HOHLE J, HOHLE M. Accuracy Assessment of Digital Elevation Models by Means of Robust Statistical Methods[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(4): 398-406.

[30] 於佳宁,刘凯,张冰玥,等. 中国区域 TanDEM-X 90 m DEM高程精度评价及其适用性分析[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(4):646-657.
YU Jianing, LIU Kai, ZHANG Bingyue, et al. Vertical Accuracy Assessment and Applicability Analysis of TanDEM-X 90 m DEM in China[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2021, 23(4): 646-657.

[31] 关小荣. SRTM DEM和ASTER GDEM误差的空间分布特征[D]. 南京:南京师范大学, 2017.
GUAN Xiaorong. Spatial Distribution of SRTM DEM and ASTER GDEM Error [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2017.

[32] 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 Zhiyuan, XIE Yuanli, WANG Ninglian, et al. Response of Three Global DEM Data Accuracy to Different Terrain Factors in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(2): 184-191.

[33] HAWKER L, NEAL J, BATES P. Accuracy Assessment of the TanDEM-X 90 Digital Elevation Model for Selected Floodplain Sites [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: 111319.

[34] 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 Shangmin, CHENG Weiming, JIANG Jingtian, 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.