

引用格式: Du Y, Hu Y, Fu H C, *et al*, 2026. Accuracy evaluation and bias analysis of multiple high-resolution DEM products: A case study of Anhui Province [J]. Remote Sensing Technology and Application, 41(4): 991-1002. [杜懿, 胡妍, 付含聪, 等, 2026. 多种高分辨率DEM产品精度评估及误差分析——以安徽省为例[J]. 遥感技术与应用, 41(4): 991-1002.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2026.4.0989

多种高分辨率DEM产品精度评估及误差分析 ——以安徽省为例

杜懿¹, 胡妍¹, 付含聪¹, 龙铠豪², 王大刚²

(1. 安庆师范大学 能源环境与空间信息工程学院, 安徽 安庆 246133;

2. 中山大学 地理科学与规划学院, 广东 广州 510275)

摘要: 对数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)进行精度评估是保障其在各领域可靠应用的重要前提。考虑到传统地面测量方法很难适用于大范围DEM数据精度评估,以第二代冰、云和陆地高程卫星搭载的地学激光测高系统(ICESat-2/ATL08)为参考,综合数字地形分析和数理统计分析方法,对8种全球DEM产品在安徽省的质量表现进行评估,并对各产品的误差特性进行探究。结果表明:FABDEM和GEDTM30两种产品整体精度最高,平均绝对误差分别为0.70 m和0.73 m;DEM产品精度表现受地形因子影响显著,对于全部8种产品,其精度在高海拔带(≥ 500 m)、高坡度带($\geq 25^\circ$)以及平面坡向(0°)下表现最佳;此外,DEM产品精度与下垫面特征关系密切,大多数产品在中山地貌以及农田覆被类型下误差更低。研究成果对区域DEM产品的选取和应用等具有指导意义。

关键词: 数字高程模型(DEM);精度评估;ICESat-2;FABDEM;GEDTM30

中图分类号: TP732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2026)04-0989-12

1 引言

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是地表形态的数字化表达,是地学分析的基础数据,广泛应用于全球变化、数字地球、自然灾害等领域(唐新明等, 2021; 管李义等, 2020)。由于DEM常被用作各类模型(如水文水动力模型、气候与生态模型、地质地貌模型等)的重要参数,且DEM质量在区域尺度上存在空间变化,因此在具体使用前对其开展精度验证至关重要(於佳宁等, 2021; 周毅阳等, 2023; 段现辉等, 2024)。现阶段,对于DEM产品进行质量评估的参考数据来源主要有GPS野外实测、高程控制点、机载雷达以及星载激光雷达

数据等(丁夏萌等, 2022; Zhao等, 2011)。其中, GPS测量可以获得较高精度的地面控制点,但由于其工作量大,很难获取大面积范围的测量点(Apeh等, 2019);高程控制点存在相关部门的保密需求,一般难以获取(李振洪等, 2018);机载雷达虽然可以获取较大范围内高精度的参考点,但数据获取成本较大,限制了大规模应用(赵尚民等, 2020)。星载激光雷达由于具有精度高、全天时、覆盖广等优势,已成为目前获取高程基准数据的新途径(Parrish等, 2025)。

基于星载激光雷达测高数据进行DEM产品的适用性评估已有较多成果,如Pandey等(2017)使用ICESat星载激光雷达数据研究SRTM、ASTER

收稿日期: 2025-09-16; 修订日期: 2026-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52579030), 广东省自然科学基金(2025A1515011666)。

作者简介: 杜懿(1994—), 男, 安徽定远人, 讲师, 主要从事全球变化与地理遥感研究。E-mail: duyid@aqnu.edu.cn

通信作者: 王大刚(1975—), 男, 河北张家口人, 教授, 主要从事地球系统科学研究。E-mail: wangdag@mail.sysu.edu.cn

GDEM和TanDEM-X等产品在印度西部喜马拉雅冰川区域的精度表现,结果表明TanDEM-X质量最高;高志远等(2019)以ICESat/GLAH14测高数据为参考,对比分析HydroSHEDS DEM、SRTM和ASTER GDEM等产品在青藏高原的偏差情况,发现SRTM整体精度最高,平均误差仅为0.49 m;郑迎辉等(2024)基于ICESat-2/ATL08激光测高数据探究了AW3D30产品在河南省境内的质量表现及误差特性,结果表明AW3D30产品的误差较小,产品精度随坡度、海拔和地形起伏度的增大而降低;Okolie等(2024)则以激光雷达测高数据为基础评估了NASADEM、ASTER GDEM、COPDEM、AW3D30等多种DEM产品在非洲中南部的适用性,发现COPDEM在开普敦地区整体表现最好,而ASTER GDEM和NASADEM则在加蓬热带森林区域表现更优。以上研究表明DEM产品在不同区域的适用性表现可能存在较大差异,因此针对具体区域需要具体分析;同时大多数研究指出同一区域内DEM精度表现也可能受局地地理因子的影响。概括地看,过往研究仍存在一些不足,主要集中在以下几个方面:①对FABDEM、GEDTM30等新近发

布的DEM产品缺少系统评估,特别是与主流DEM数据的对比;②评价过程中,对于基准高程点的质量控制不够严格,这可能导致评价结果存在较大不确定性;③对于DEM产品的误差特征及影响因子分析不足,尤其是产品精度与下垫面特征间的关系。

鉴于此,本研究借助第二代星载激光雷达陆地地表高程产品ICESat-2/ATL08,综合利用数字地形法和数理统计法对8种全球开源DEM产品在安徽省的精度表现及误差特征进行探究,研究成果可为区域DEM产品的选择提供科学参考。

2 研究区和数据

2.1 研究区

安徽省($29^{\circ}41' \sim 34^{\circ}38' \text{ N}$, $114^{\circ}54' \sim 119^{\circ}37' \text{ E}$)位于我国中东部,地跨淮河、长江和新安江三大流域,全省总面积 $14.01 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。地势上,由北向南呈阶梯状递增,淮河以北是平原,江淮之间东部以丘陵为主,江淮之间西部以及长江以南区域分别为大别山脉和黄山山脉(吴楠等,2023;石春娥等,2022)。安徽省空间覆盖范围及地理高程分布如图1所示。

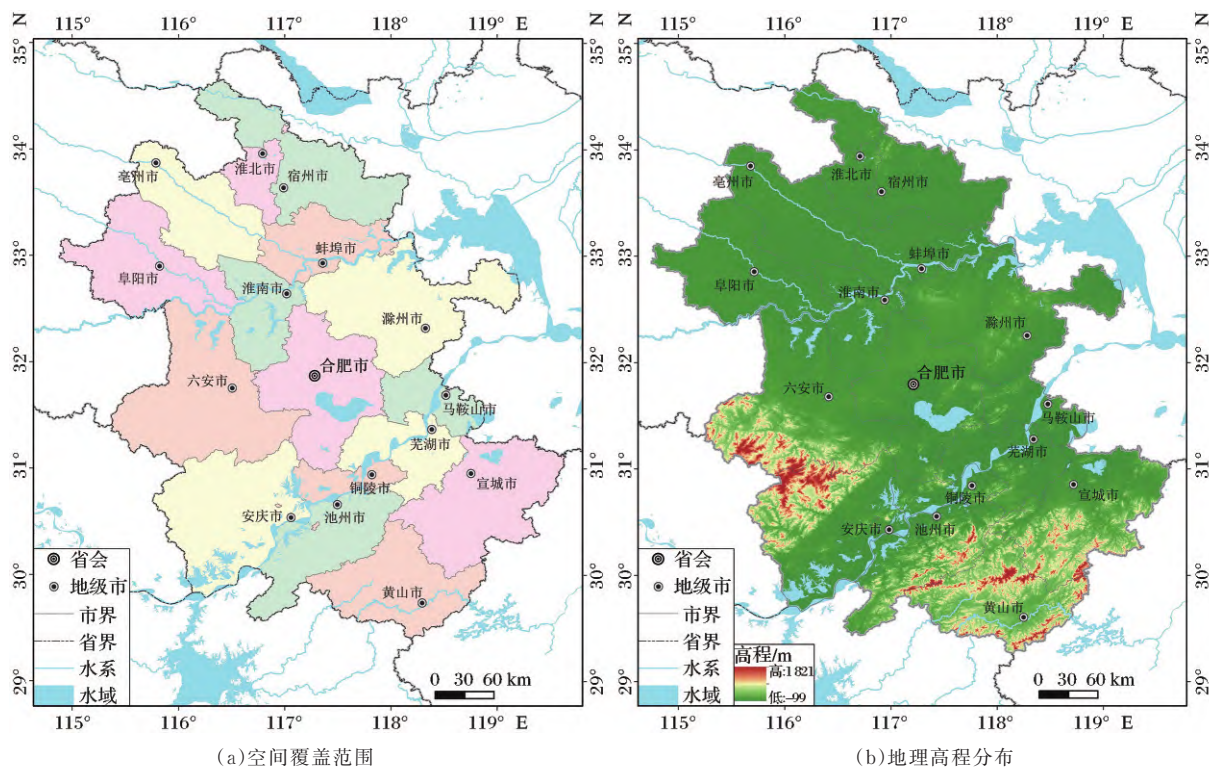


图1 安徽省空间范围及地理高程示意图

审图号:GS(2026)0650

Fig.1 Schematic diagram of spatial coverage and geographic elevation of Anhui Province

2.2 数据源

本研究使用的数据主要包括星载激光雷达测高数

据ICESat-2/ATL08,8种全球开源DEM数据(表1)、研究区地貌类型数据以及土地覆被类型数据等。

ICESat-2 (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2) 是美国国家航空航天局 (NASA) 于 2018 年 9 月发射的第二代激光高程观测卫星, 继承并扩展了原 ICESat 的任务 (王密等, 2021)。ICESat-2 搭载的光子计数激光测高仪 (ATLAS) 应用了微脉冲多波束光子计数激光雷达技术, 可以获取全球范围

大量包含高精度高程信息的激光点数据 (燕金凤等, 2024)。ATL08 是 ICESat-2 提供的陆地表面分类产品, 具有极高的测量精度, 该产品在水平和垂直方向上均采用 WGS84 高程基准。ICESat-2/ATL08 数据可从国际冰雪数据中心获取 (<https://nsidc.org/data/explore-data>)。

表 1 8 种全球数字高程模型产品的基本信息

Table 1 Basic information of eight global digital elevation model products

数据集	覆盖范围	分辨率/m	版本	空间参考	获取地址
ASTER GDEM	83°N~83°S	30	V3	WGS84/EGM96	https://search.earthdata.nasa.gov/
AW3D30	82°N~82°S	30	V4.1	WGS84/EGM96	https://www.eorc.jaxa.jp/
COPDEM	90°N~90°S	30	V2023-1	WGS84/EGM08	https://browser.dataspace.copernicus.eu/
FABDEM	90°N~90°S	30	V1.2	WGS84/EGM08	https://data.bris.ac.uk/data/dataset/
GEDTM30	90°N~90°S	30	V1	WGS84/EGM08	https://github.com/openlandmap/GEDTM30
NASADEM	90°N~90°S	30	V1	WGS84/EGM96	https://search.earthdata.nasa.gov/
SRTM1	60°N~56°S	30	V3	WGS84/EGM96	https://earthexplorer.usgs.gov/
TanDEM-X	90°N~90°S	30	EDEM	WGS84/WGS84	https://download.geoservice.dlr.de/TDM30_EDEM/

SRTM 是由美国发射的航天飞机于 2000 年历时 11 d 飞行完成的测量任务, 创建了有史以来第一个近全球陆地海拔数据集 (黄帅元等, 2023), 根据分辨率差异, 可分为 SRTM1 和 SRTM3 两种产品; ASTER GDEM 是 NASA 根据新一代对地观测卫星 Terra 的观测结果制作的数字高程模型, 采用了光学立体成像技术 (Yue 等, 2017), 覆盖范围达到地球陆地表面的 99%; NASADEM 是 NASA 于 2020 年发布的全球数字高程模型, 该数据是 SRTM 数据的重新处理 (Uuemaa 等, 2020), 通过纳入 ASTER GDEM、ICESat/GLAS 和 PRISM 数据集集中的辅助数据, 提高了准确性; COPDEM 是欧洲空间局开发的全球数字高程模型, 该产品使用雷达高度计、光学卫星和激光雷达等各种技术收集高程数据, 包含 GLO-90 和 GLO-30 两个不同分辨率的公开产品 (Wang 等, 2025); TanDEM-X 是德国航空航天中心进行的雷达地球观测任务, 用于生成全球数字高程模型, TanDEM-X 30m EDEM 则是在 TanDEM-X 任务框架内获得的全球数字高程模型的产品变体 (李文梁等, 2020); AW3D30 是由日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 卫星 ALOS 搭载的 PRISM 光学传感器生成的全球数字表面模型, 制作过程中为保证覆盖完整性和平滑过渡, 使用到 SRTM 等数据源 (李昕等, 2024); FABDEM 是在 COPDEM 基础上, 结合全球森林高度数据和建筑物高度数据, 通过去除森林和建筑物的影响生成的一种全球高精度数字高程模型 (Saber 等, 2023); GEDTM30 是新

近发布的覆盖全球范围的高分辨率数字地形模型, 通过机器学习算法整合如光学影像、激光雷达等多源异构数据 (Ho 等, 2025)。

地貌类型数据来源于中国科学院发布的《中华人民共和国地貌图集 (1:100 万)》, 该图集是全面反映中国地貌宏观规律、揭示区域地貌空间分异的国家级基本比例尺图集 (周成虎等, 2009), 主要包括平原、台地、丘陵、低山、中山、(极)高山等地貌类型 (<http://www.resdc.cn/>)。土地覆被数据采用武汉大学发布的《中国逐年土地覆被数据集 (CLCD)》, 该数据集基于 GEE 上所有陆地卫星图像制作而成 (Yang 等, 2021), 涵盖了 1985—2024 年的逐年土地覆被信息, 分辨率 30 m, 包括 9 种地表覆被类型 (<http://doi.org/10.5281/zenodo.4417809>)。

3 研究方法

3.1 高程控制点提取

提取研究区 2018—2020 年 ICESat-2/ATL08 激光点测高数据以获取 DEM 产品评价的基准数据。高程控制点提取流程如图 2 所示, 图中各属性参数描述及取值区间参见文献 (章诗芳等, 2025; 郑迎辉等, 2022)。

3.2 DEM 产品高程基准统一

除 TanDEM-X 外, 其余 DEM 产品高程基准均与参考数据 (ICESat-2/ATL08) 不同, 因此需要对其进行统一, 即转换至 WGS84 椭球体高度。转换公式如下 (蒋广鑫等, 2020):

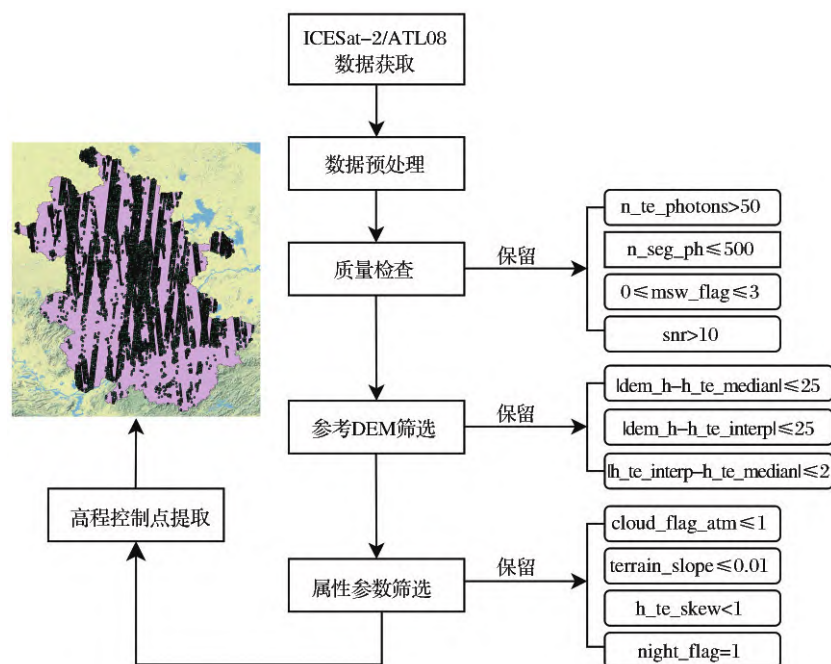


图2 ICESat-2/ATL08数据高程控制点提取流程示意图

Fig.2 Schematic diagram of the process of extracting elevation control points of ICESat-2/ATL08

$$h = H + N \quad (1)$$

其中: h 表示基于WGS84椭球体的大地高; H 表示基于EGM96/EGM08大地水准面的正高; N 为EGM96/EGM08大地水准面与WGS84椭球体之间的高程差,称大地水准面差距。

3.3 统计评价指标

选用相对偏差(Relative Bias, RB)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)以及平均绝对百分比误差(Mean Absolute Percentage Error, MAPE)等指标来表征不同DEM产品的精度表现。各指标的计算公式如下:

$$RB = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{\sum_{i=1}^n y_i} \times 100\% \quad (2)$$

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (4)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - x_i}{y_i} \right| \times 100\% \quad (5)$$

其中: n 为样本数; x_i 、 y_i 为第 i 个样本的模拟值和参考值。其中,RB值为正,表明倾向于高估,RB值为负则倾向于低估;其余指标值越接近于0,表示模拟

能力越好,反之则越差。

3.4 高程控制点约束

为尽可能区别不同DEM产品的质量差异,本研究对提取到的高程控制点进行了严格质量约束。首先,计算提取到的ICESat-2/ATL08激光点高程(基准值)与全部8种DEM产品相应位置高程(模拟值)的MAPE值,若任一DEM产品在某激光点处的MAPE值高于50%,即对该点做剔除处理,最终保留96128个激光点测高数据;最后基于此96128个激光点的高程数据,同时提取8种DEM产品在相应位置的高程模拟值,构建评价样本。

4 结果分析

4.1 DEM产品整体精度评估

对96128个激光点处的ICESat-2/ATL08测高数据以及8种DEM产品高程值进行基本描述统计分析,结果如表2所列。均值方面,ASTER GDEM在均值上偏小明显,意味着该产品存在较大的系统低估;AW3D30均值较ICESat-2/ATL08偏大,说明存在一定高估;其他产品在系统误差上表现不明显。极值方面,8种DEM产品均低估了研究区内的最低点高程,大多数产品则又对最高点高程有所高估,尤其是ASTER GDEM和TanDEM-X。在数据的离散程度方面,8种产品与ICESat-2/ATL08测高数据相差不大,标准差均集中在30.6 m附近。极

表2 ICESat-2/ATL08和8种DEM产品高程数据基础描述统计分析

Table 2 Basic descriptive statistical analysis of ICESat-2/ATL08 values and eight DEM products

数据集	平均值 /m	最大值 /m	最小值 /m	标准差 /m	极差 /m
ICESat-2/ATL08	28.36	1 196.88	2.18	30.62	1 194.70
ASTER GDEM	25.10	1 219.23	1.67	30.50	1 217.56
AW3D30	29.32	1 197.13	1.55	30.83	1 195.58
COPDEM	28.72	1 197.27	1.58	30.79	1 195.69
FABDEM	28.46	1 199.67	1.92	30.66	1 197.76
GEDTM30	28.12	1 191.48	1.48	30.57	1 190.00
NASADEM	28.54	1 192.87	1.31	30.76	1 191.56
SRTM1	28.55	1 195.61	1.31	30.84	1 194.30
TanDEM-X	28.75	1 206.41	1.43	30.79	1 204.98

差方面,与其他DEM产品相比,ASTER GDEM和TanDEM-X偏大明显,而GEDTM30和NASA-DEM则稍微偏小。

图3显示的是8种DEM产品在研究区内高程误差的整体分布情况。由图3可见,大多数DEM产品的高程误差分布趋近于正态分布,但分布形态和峰值位置有所差异。其中,ASTER GDEM误差分布范围最广,多数控制点偏差位于-20~10 m区间,且分布呈负偏态,表明在多数控制点处该产品倾向于低估;AW3D30、NASADEM和SRTM1等产品的误差分布更为接近于正态分布(AW3D30表现出一定的正偏态),控制点处高程误差集中在-5.0~5.0 m区间,这可能是由于在NASADEM和AW3D30两种产品的制作过程中均使用了SRTM作为辅助数据;COPDEM、FABDEM、GEDTM30、TanDEM-X等产品的高程误差分布情况较为相似,主要表现为在绝大部分控制点处模拟误差集中在-0.5~0.5 m区间,表明这些DEM产品的整体误差较小,这可能得益于3种产品在生成中使用了多源异构数据。

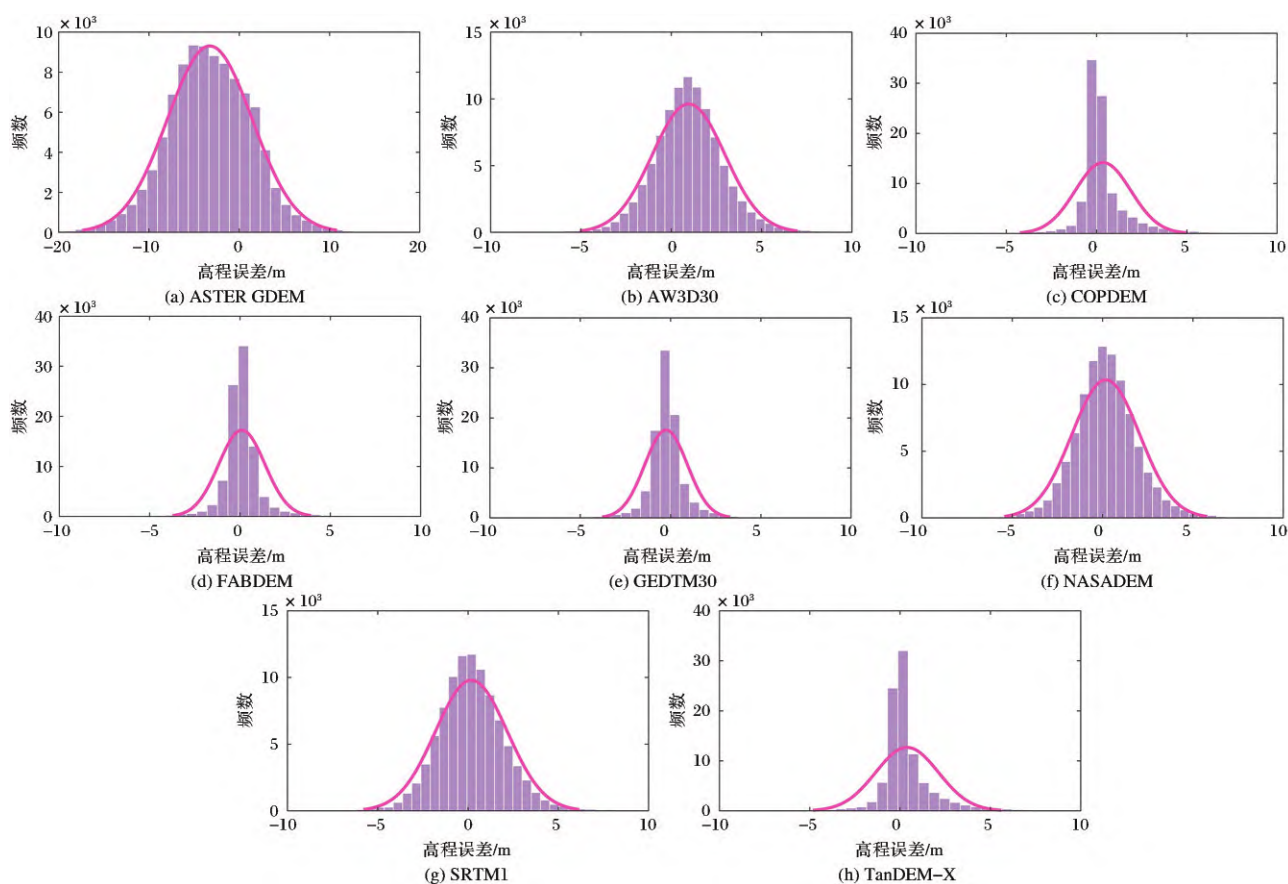


图3 DEM产品在研究区的高程误差分布

Fig.3 Distribution of elevation biases of eight DEM products in the study area

为定量描述各DEM产品在研究区的整体精度表现,图4给出了基于多种评价指标的精度评估结果。可以看出,在相对误差方面,仅ASTER GDEM和GEDTM30存在低估,其余产品则均存在高估;

其中,ASTER GDEM低估最为严重(RB值为-11.48%),而AW3D30则表现出最大程度的高估(RB值为3.39%)。绝对误差方面,8种DEM产品的精度表现由高到低依次为FABDEM、GEDTM30、

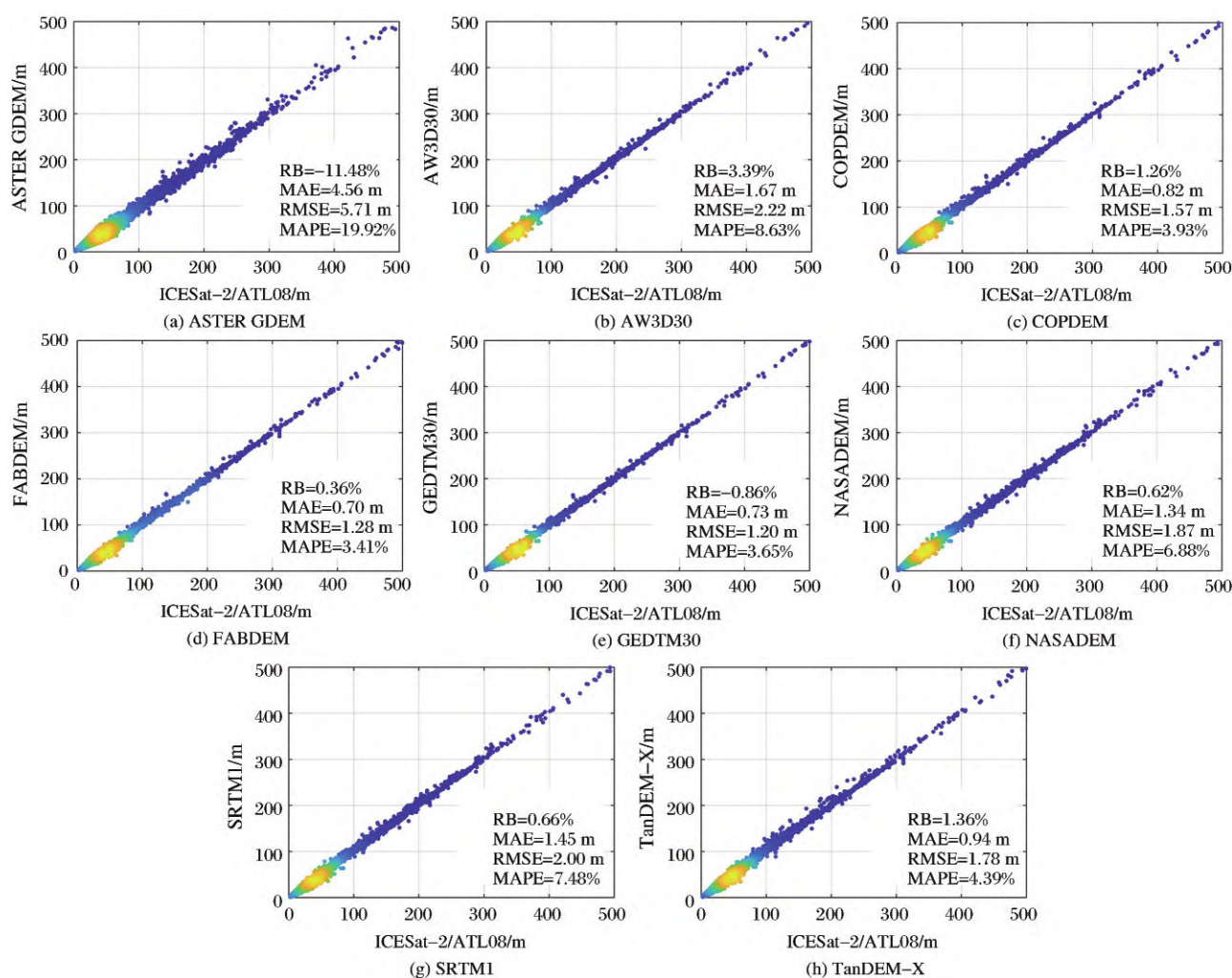


图4 DEM产品在研究区的整体模拟精度评估

Fig.4 Accuracy evaluation of different DEM products in the study area

COPDEM、TanDEM-X、NASADEM、SRTM1、AW3D30和ASTER GDEM。整体来看,FABDEM和GEDTM30两种产品表现出明显的精度优势。

4.2 不同地形条件下DEM产品精度评估

过往研究表明(蒋广鑫等,2022;武文娇等,2017),DEM产品精度可能受区域地形条件影响。基于此,本研究深入探讨在不同地形条件下DEM产品精度表现是否存在空间分异,如果存在则又表现出何种规律。考虑到FABDEM产品的整体精度最高,因此基于该产品进行研究区坡度和坡向等地形因子的提取,结果如图5(a)和图5(b)所示。

4.2.1 DEM精度与海拔因子关系

对研究区高程控制点按海拔高低进行分级,分别选取10、100、300和500 m作为不同海拔带的临界高度值,统计8种DEM产品在不同海拔带下的RB值和MAPE值,结果如表3所列。可以看出,全部DEM产品的精度均表现出随海拔升高而增加的

规律(图6(a)),这可能是因为ICESat-2/ATL08激光点实际测得的是陆地裸土高程(不含植被冠层高度),而在低海拔区域由于地表覆盖有大量树木和建筑物等,导致DEM产品误差较大。

具体来看,在全部海拔区间,FABDEM、GEDTM30和COPDEM相较于其余产品始终表现出更高的精度,其中FABDEM在中低海拔带(<300 m)质量最高,GEDTM30则在高海拔带(>300 m)质量最高;ASTER GDEM整体上所表现出的低估现象(图6(a))主要是其在10~100 m海拔带内的严重低估(RB值为-13.37%)所导致;AW3D30、NASADEM以及SRTM1三种产品在100 m以下的海拔带模拟偏差较大($\text{MAPE} \geq 6\%$),但在100 m以上海拔带精度提升明显($\text{MAPE} \leq 3\%$);较之其他产品,TanDEM-X精度表现对于高程变化敏感性较低。

4.2.2 DEM精度与坡度、坡向因子关系

将研究区高程控制点根据坡度划分为 $[0^\circ, 2^\circ)$ 、

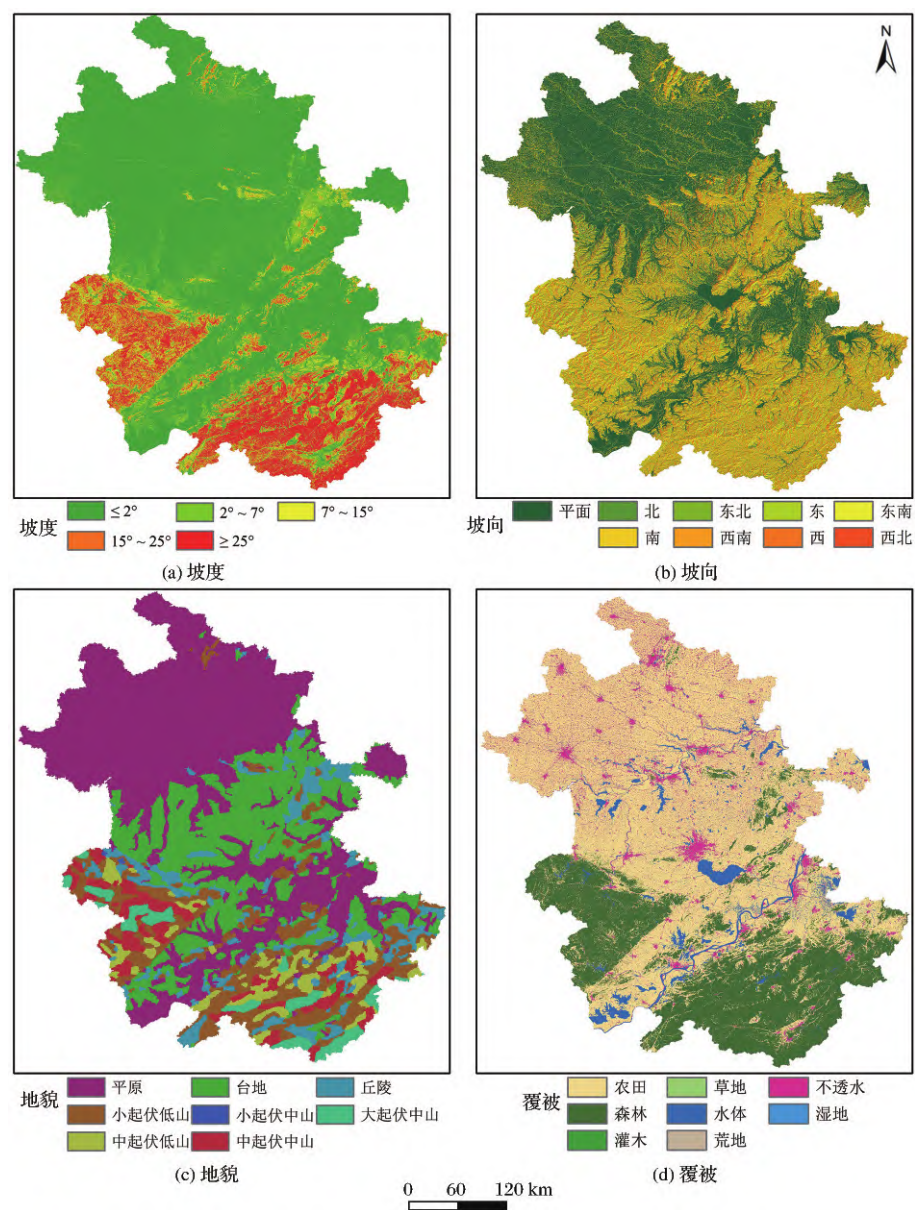


图 5 安徽省 30 m 分辨率下坡度、坡向、地貌和土地覆被的空间分布 审图号:GS(2024)0650

Fig.5 Spatial distribution of slope, aspect, landform and land cover at 30 m resolution in Anhui Province

表 3 不同高度带下 8 种 DEM 产品精度表现对比

数据集	≤10 m		10~100 m		100~300 m		300~500 m		≥500 m	
	RB/%		MAPE/%		RB/%		MAPE/%		RB/%	
	MAPE/%	RB/%	MAPE/%	RB/%	MAPE/%	RB/%	MAPE/%	RB/%	MAPE/%	RB/%
ASTER GDEM	7.14	22.15	-13.37	19.97	-1.79	3.79	0.69	1.89	0.36	1.23
AW3D30	5.09	18.27	3.66	7.65	0.99	1.73	1.03	1.16	0.62	0.64
COPDEM	-0.82	7.65	1.42	3.55	0.69	1.26	0.37	1.05	0.16	0.51
FABDEM	-1.79	7.47	0.45	2.99	0.22	1.11	-0.07	1.03	-0.07	0.48
GEDTM30	-5.42	8.44	-0.76	3.14	-0.68	1.53	-0.40	0.87	-0.13	0.35
NASADEM	-2.22	14.96	0.76	6.03	0.15	2.28	0.92	1.44	0.06	0.61
SRTM1	-1.83	17.08	0.75	6.47	0.52	2.39	1.22	1.64	0.29	0.65
TanDEM-X	0.14	8.66	1.52	3.94	0.50	2.38	0.60	1.47	0.23	0.54

[2°, 7°)、[7°, 15°)、[15°, 25°)和≥25°等坡度带，并计算各坡度带下DEM产品的误差指标值(表4)。

可见,ASTER GDEM、AW3D30和SRTM1等产品的高程误差随坡度增加而减小,其余产品精度则随

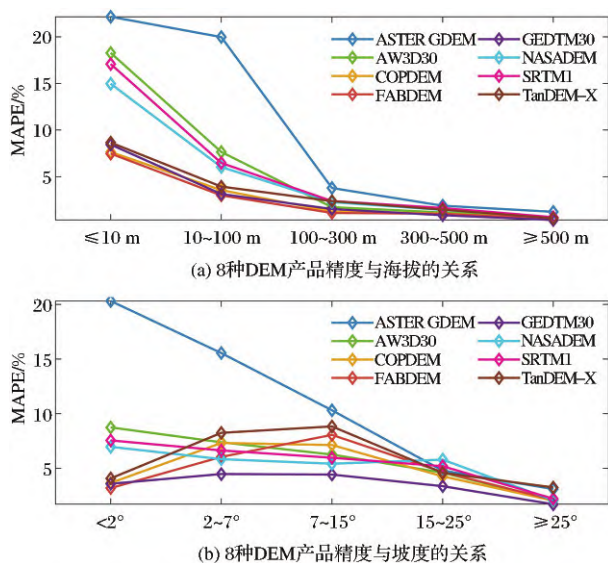


图6 基于平均绝对百分比误差的8种DEM产品精度与海拔、坡度的关系

Fig.6 Relationship between the accuracy of eight DEM products and altitude and slope based on MAPE

坡度变化呈现出不同形态的倒U型关系,且最大误差表现均集中在 $2^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 区间(图6(b));ASTER GDEM的系统性低估主要集中在 $\leq 15^{\circ}$ 坡度带,且坡度越小,低估越严重;8种DEM产品均在 $\geq 25^{\circ}$ 坡度带表现出最佳精度;GEDTM30产品在各坡度带内始终表现最为优秀,MAPE值始终低于5%。

参考数字地形分析中常用的坡向分类方法,将坡向划分为平面(0°)、东($67.5^{\circ}\sim 112.5^{\circ}$)、东南($112.5^{\circ}\sim 157.5^{\circ}$)、南($157.5^{\circ}\sim 202.5^{\circ}$)、西南($202.5^{\circ}\sim 247.5^{\circ}$)、西($247.5^{\circ}\sim 292.5^{\circ}$)、西北($292.5^{\circ}\sim 337.5^{\circ}$)、北($337.5^{\circ}\sim 360^{\circ}$), $0^{\circ}\sim 22.5^{\circ}$)和东北($22.5^{\circ}\sim 67.5^{\circ}$)共9个坡向级。由不同DEM产品在各坡向下的均方根误差分布可知(图7),ASTER GDEM在所有坡向上精度均表现不佳($RMSE\geq 5$ m),误差远高于其他产品;8种DEM产品均在平面坡向下表现出最佳精度,且GEDTM30和FABDEM两种产品在所有坡向下均较其余产品表现更优。此外,8种DEM产

表4 不同坡度带下8种DEM产品精度表现对比

Table 4 Comparison of the accuracy of eight DEM products under different slope zones

数据集	$0^{\circ}\sim 2^{\circ}$		$2^{\circ}\sim 7^{\circ}$		$7^{\circ}\sim 15^{\circ}$		$15^{\circ}\sim 25^{\circ}$		$\geq 25^{\circ}$	
	RB/%	MAPE/%	RB/%	MAPE/%	RB/%	MAPE/%	RB/%	MAPE/%	RB/%	MAPE/%
ASTER GDEM	-12.47	20.32	-7.73	15.55	-1.00	10.31	1.14	4.80	1.68	3.10
AW3D30	3.49	8.75	3.08	7.38	2.19	6.26	1.69	4.60	1.47	2.06
COPDEM	0.98	3.67	3.27	7.32	2.35	7.13	1.08	4.27	0.92	2.04
FABDEM	0.12	3.19	1.89	6.05	1.64	8.06	0.81	4.66	-0.28	2.11
GEDTM30	-1.08	3.59	0.45	4.48	0.52	4.43	-0.04	3.37	-0.39	1.71
NASADEM	0.48	6.97	1.34	5.84	1.90	5.42	1.22	5.79	0.32	2.08
SRTM1	0.43	7.56	1.98	6.64	2.31	5.97	1.45	5.19	0.39	2.22
TanDEM-X	1.02	4.08	3.61	8.25	2.97	8.84	1.36	4.59	0.52	3.25



图7 基于均方根误差指标的不同坡向下8种DEM产品精度表现

Fig.7 Accuracy performance of DEM products at different slopes based on RMSE

品在北向较之南向普遍表现出更小的误差,如AW3D30、FABDEM、GEDTM30、NASADEM、SRTM1和TanDEM-X等产品均在南向表现出更大误差。过往研究(李文梁等,2020)同样发现了这一现象,可能的原因是对于雷达数据,坡向决定了雷达入射角、阴影和相干性,由于北坡往往能够获得更好的雷达回波特征,因此能有效减少几何畸变。

4.3 不同下垫面条件下DEM产品精度评估

基于研究区覆盖范围对中国地貌类型数据集和中国土地覆被数据集(2020年)进行裁剪,得到研究区8种地貌类型(图5(c))以及8种地表覆盖类型(图5(d))的空间分布。

8种DEM产品在不同地貌类型下的高程模拟均方根误差如图8(a)所示,这里将小起伏低山、中起伏低山合并为低山类型,将小起伏中山、中起伏中山和大起伏中山合并为中山类型。可以看出,较之其他产品,ASTER GDEM在全部地貌下均表现最差,且精度分布与控制点所处地貌类型存在一定关联;全部地貌类型下,GEDTM30和FABDEM两种产品的精度均表现优秀,前者在平原、台地、低

山、中山等地貌下精度最高,而后者在丘陵地貌下精度最高;整体来看,除ASTER GDEM外,其余DEM产品在平原、台地和中山等地貌类型下的精度表现要优于丘陵和低山等地貌。

8种DEM产品在不同地表覆被类型下的高程模拟均方根误差如图8(b)所示,由于湿地和灌木两种覆被类型在研究区分布较少,样本数量不足限制了其统计显著性,因此未对这两种覆被类型进行分析。可以看出,不同DEM产品的精度表现随土地覆被类型变化呈现出较大差异。具体来看,ASTER GDEM、COPDEM和FABDEM共3种产品在草地和森林覆被下误差较大,而AW3D30、GEDTM30、NASADEM和SRTM1等产品则在荒地和不透水覆被下误差较大,尤其是后两种产品表现得更为显著($RMSE > 19\text{ m}$);值得一提的是,ASTER GDEM在荒地和不透水两种覆被类型下,精度表现远高于其余产品($RMSE < 2\text{ m}$),意味着该产品在特殊用途方面存在较高潜力。总体而言,除ASTER GDEM外,DEM产品在农田这一土地覆被下精度最高。

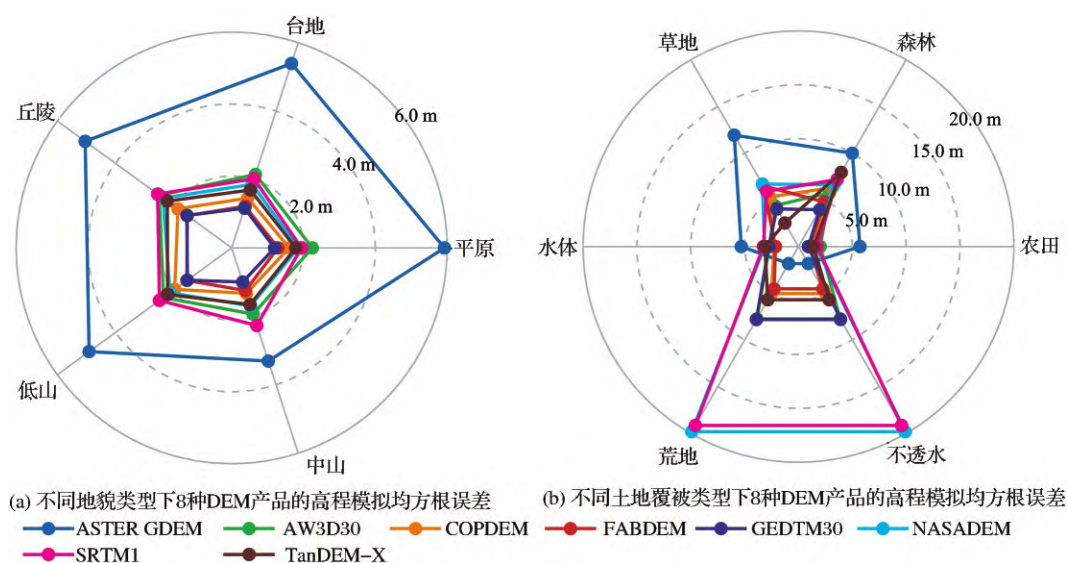


图8 基于均方根误差指标的不同地貌、土地覆被下8种DEM产品精度表现

Fig.8 Accuracy performance of DEM products under different landforms and land covers based on RMSE

5 结论与讨论

基于研究区9万多个ICESat-2/ATL08激光点测高数据,评估8种DEM产品在安徽省境内的精度表现,并分析不同DEM产品的误差特性。主要得到以下结论:①整体上,FABDEM和GEDTM30两种产品在安徽省境内表现最佳,而ASTER GDEM产品表现最差;②DEM产品高程误差与地形因子

间存在密切联系。全部DEM产品精度随海拔增加而提升,且在高坡度带($\geq 25^\circ$)以及平面坡向下(0°)误差最小;③DEM产品精度受下垫面特征影响。绝大多数DEM产品在中山地貌类型以及农田覆被类型下精度更高。

GEDTM30产品之所以表现优秀可能是由于其发布时间最近,且在制作过程中利用机器学习算

法融合了大量多源高程数据。FABDEM产品的高精度优势则是因为其属于真正的地面高程模型,其他产品本质上是地表高程模型。此外,本研究取得的主要结论与前人成果具有较好一致性,如胡加佩等(2017)的研究表明在中国区域 SRTM 精度要优于 ASTER GDEM,本研究同样支持这一结论;秦臣臣(2020)对 SRTM、AW3D30 和 ASTER GDEM 在山东省的误差特征进行了分析,发现 3 种产品的误差分布接近正态分布,本研究也得出类似结论。然而,仍需指出的是,研究结果仍存在一定不确定性,主要体现在:①虽然通过质量控制筛选出 9 万多个高程控制点,且这些点在各级海拔带以及各类地貌、地表覆被类型下均有分布,但其空间分布较不均匀;②研究使用的 ICESat-2/ATL08 激光测高数据主要生产于 2018—2020 年,而 8 种 DEM 产品的生产时间却相差较大,由于产品间数据来源的现势性差异,必然会对评价结果造成影响;③激光高程观测卫星在运行过程中,由于重力环境变化、平台震动等影响,观测系统的指向角等参数可能会发生变化,因此可能导致激光足印点的平面和高程误差,而本研究对此未做考虑。

参考文献(References):

- Apeh O I, Uzodinma V N, Ebinne E S, et al, 2019. Accuracy assessment of ALOS W3D30, ASTER GDEM and SRTM30 DEM: A case study of Nigeria, west Africa[J]. *Journal of Geographic Information System*, 11(2): 111-123. DOI: 10.4236/jgis.2019.112009
- Ding X M, Zhang J X, Guo J, et al, 2022. Vertical accuracy evaluation of DEM data based on ICESat-2 ATLAS[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (12): 84-90.[丁夏萌, 张继贤, 郭婧, 等, 2022. 基于 ICESat-2 ATLAS 数据的 DEM 高程精度评价[J]. *测绘通报*, (12): 84-90.]
- Duan X H, Li L J, Li J Z, 2024. Study on the influence of topographic data accuracy on watershed flood simulation[J]. *Journal of China Hydrology*, 44(1): 33-36, 49.[段现辉, 李磊菁, 李建柱, 2024. 地形格网大小对小流域洪水模拟影响研究[J]. *水文*, 44(1): 33-36, 49.]
- Gao Z Y, Xie Y L, Wang N L, et al, 2019. Response of three global DEM data accuracy to different terrain factors in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 39(2): 184-191.[高志远, 谢元礼, 王宁练, 等, 2019. 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*, 39(2): 184-191.]
- Guan L Y, Chen S Y, Zou S Y, et al, 2020. Comparative analysis of several freely available DEM datasets[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 43(10): 21-23.[管李义, 陈斯飏, 邹思远, 等, 2020. 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*, 43(10): 21-23.]
- Ho Y F, Grohmann C H, Lindsay J, et al, 2025. GEDTM30: Global ensemble digital terrain model at 30 m and derived multi-scale terrain variables[J]. *PeerJ*, 13: e19673. DOI: 10.7717/peerj.19673
- Hu J P, Guan X R, Liu X J, 2017. Spatial distribution of SRTM DEM and ASTER GDEM error in China[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 33(4): 28-33.[胡加佩, 关小荣, 刘学军, 2017. 中国区域 SRTM DEM 与 ASTER GDEM 误差空间分布特征[J]. *地理与地理信息科学*, 33(4): 28-33.]
- Huang S Y, Dong Y F, Li H P, 2023. Establishment and comparative analysis of SRTM1 DEM error correction model in the Loess Plateau[J]. *Journal of Geo-information Science*, 25(3): 669-681.[黄帅元, 董有福, 李海鹏, 2023. 黄土高原区 SRTM1 DEM 高程误差校正模型构建及对比分析[J]. *地球信息科学学报*, 25(3): 669-681.]
- Jiang G X, Xie Y L, Gao Z Y, et al, 2020. Evaluation on elevation accuracy of commonly used DEM in five typical areas of China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 27(5): 72-80.[蒋广鑫, 谢元礼, 高志远, 等, 2020. 中国 5 类典型区域常用 DEM 高程精度评价[J]. *水土保持研究*, 27(5): 72-80.]
- Li W L, Wang C S, Zhu W, 2020. Error spatial distribution characteristics of TanDEM-X 90 m DEM over China[J]. *Journal of Geo-information Science*, 22(12): 2277-2288.[李文梁, 汪驰升, 朱武, 2020. 中国大陆地区 TanDEM-X 90 m DEM 误差空间分布特征[J]. *地球信息科学学报*, 22(12): 2277-2288.]
- Li X, Hu L R, Qiao J P, et al, 2024. Accuracy assessment of global DEMs based on GF-7 laser altimetry data[J]. *Geospatial Information*, 22(8): 93-96, 115.[李昕, 胡柳茹, 乔俊平, 等, 2024. 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*, 22(8): 93-96, 115.]
- Li Z H, Li P, Ding D, et al, 2018. Research progress of global high resolution digital elevation models[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43(12): 1927-1942.[李振洪, 李鹏, 丁咚, 等, 2018. 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)*, 43(12): 1927-1942.]
- Okolie C J, Mills J P, Adeleke A K, et al, 2024. Assessment of the global Copernicus, NASADEM, ASTER and AW3D digital elevation models in Central and Southern Africa[J]. *Geo-spatial Information Science*, 27(4): 1362-1390. DOI: 10.1080/10095020.2023.2296010
- Pandey P, Manickam S, Bhattacharya A, et al, 2017. Qualitative

- and quantitative assessment of TanDEM-X DEM over western Himalayan glaciated terrain[J]. *Geocarto International*, 32(4): 442-454. DOI:10.1080/10106049.2016.1155655
- Parrish C E, Magruder L A, Perry J, et al, 2025. Analysis and accuracy assessment of a new global nearshore ICESat-2 bathymetric data product [J]. *Earth and Space Science*, 12(8): e2025EA004391. DOI:10.1029/2025ea004391
- Qin C C, 2020. Elevation accuracy evaluation and correction of SRTM, ALOS and ASTER GDEM in Shandong Province based on ICESat/GLAS[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology.[秦臣臣, 2020. 基于 ICESat/GLAS 的山东省 SRTM、ALOS 与 ASTER GDEM 高程精度评价与修正[D]. 青岛: 山东科技大学.]
- Saberi A, Kabolizadeh M, Rangzan K, et al, 2023. Accuracy assessment and improvement of SRTM, ASTER, FABDEM, and MERIT DEMs by polynomial and optimization algorithm: A case study (Khuzestan Province, Iran)[J]. *Open Geosciences*, 15: 20220455. DOI:10.1515/geo-2022-0455
- Shi C E, Zhang H, Yang G Y, et al, 2022. Climatic characteristics and influencing factors of regional extremely dense fog in Anhui Province[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 80(6): 924-939. [石春娥, 张浩, 杨关盈, 等, 2022. 安徽省区域性浓雾气候特征及影响因子[J]. *气象学报*, 80(6): 924-939.]
- Tang X M, Li S J, Li T, et al, 2021. Review on global digital elevation products[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 167-181.[唐新明, 李世金, 李涛, 等, 2021. 全球数字高程产品概述[J]. *遥感学报*, 25(1): 167-181.]
- Uuemaa E, Ahi S, Montibeller B, et al, 2020. Vertical accuracy of freely available global digital elevation models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM) [J]. *Remote Sensing*, 12(21): 3482. DOI:10.3390/rs12213482
- Wang M Y, Li H Q, Liu Y Q, et al, 2025. Multi-source DEM vertical accuracy evaluation of Taklimakan Desert hinterland based on ICESat-2 ATL08 and UAV data[J]. *Remote Sensing*, 17(11): 1807. DOI:10.3390/rs17111807
- Wang M, Wei Y, Yang B, et al, 2021. Extraction and analysis of global elevation control points from ICESat2/ATLAS data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 46(2): 184-192.[王密, 韦钰, 杨博, 等, 2021. ICESat-2/ATLAS 全球高程控制点提取与分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 46(2): 184-192.]
- Wu N, Chen N, Cheng P, et al, 2023. Analysis on characteristics and attribution of NDVI interannual change in different ecological divisions in Anhui Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 32(6): 1200-1207.[吴楠, 陈凝, 程鹏, 等, 2023. 安徽省各生态分区的 NDVI 年际变化特征及归因分析[J]. *长江流域资源与环境*, 32(6): 1200-1207.]
- Wu W J, ZHANG S F, ZHAO S M, 2017. Analysis and comparison of SRTM1 DEM and ASTER GDEM V2 data[J]. *Journal of Geo-information Science*, 19(8): 1108-1115.[武文娇, 章诗芳, 赵尚民, 2017. SRTM1 DEM 与 ASTER GDEM V2 数据的对比分析[J]. *地球信息科学学报*, 19(8): 1108-1115.]
- Yan J F, Su X L, Luo Z C, 2024. Surface elevation changes of Svalbard surge-type glaciers in 2019-2022 based on ICESat-2 altimetry [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 46(6): 1767-1779.[燕金凤, 苏晓莉, 罗志才, 2024. 基于 ICESat-2 的 2019-2022 年斯瓦尔巴群岛跃动冰川表面高程变化研究[J]. *冰川冻土*, 46(6): 1767-1779.]
- Yang J, Huang X, 2021. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 13(8): 3907-3925. DOI:10.5194/essd-13-3907-2021
- Yu J N, Liu K, Zhang B Y, et al, 2021. Vertical accuracy assessment and applicability analysis of TanDEM-X 90 m DEM in China[J]. *Journal of Geo-information Science*, 23(4): 646-657. [於佳宁, 刘凯, 张冰玥, 等, 2021. 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*, 23(4): 646-657.]
- Yue L W, Shen H F, Zhang L P, et al, 2017. High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 123: 20-34. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2016.11.002
- Zhang S F, Zhao S M, Fan J Y, 2025. Accuracy validation and evaluation of global multi-source DEM data in the Kunlun Mountains of Xinjiang based on ICESat-2/ATL08 [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 41(2): 40-46.[章诗芳, 赵尚民, 樊晶莹, 2025. 基于 ICESat-2/ATL08 的新疆昆仑山地区全球多源 DEM 数据精度验证与评价[J]. *地理与地理信息科学*, 41(2): 40-46.]
- Zhao S M, Cheng W M, Jiang J T, et al, 2020. Error comparison among the DEM datasets made from ZY-3 satellite and the global open datasets[J]. *Journal of Geo-information Science*, 22(3): 370-378.[赵尚民, 程维明, 蒋经天, 等, 2020. 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*, 22(3): 370-378.]
- Zhao S M, Cheng W M, Zhou C H, et al, 2011. 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*, 32(23): 8081-8093. DOI:10.1080/01431161.2010.532176
- Zheng Y H, Zhang Y, Wang T, et al, 2022. Elevation control points extraction and accuracy validation based on ICESat-2 data[J]. *Journal of Geo-information Science*, 24(7): 1234-1244.[郑

- 迎辉, 张艳, 王涛, 等, 2022. 基于 ICESat-2 数据的高程控制点提取和精度验证[J]. 地球信息科学学报, 24(7): 1234-1244.]
- Zheng Y H, Zhang Y, Wang T, et al, 2024. Accuracy validation and improvement of AW3D30 DEM aided by ICESat-2 data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 39(3): 557-568.[郑迎辉, 张艳, 王涛, 等, 2024. ICESat-2 数据辅助的 AW3D30 DEM 精度评价和修正[J]. 遥感技术与应用, 39(3): 557-568.]
- Zhou C H, Cheng W M, Qian J K, et al, 2009. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1:1000000 in China[J]. Journal of Geo-information Science, 11(6): 707-724.[周成虎, 程维明, 钱金凯, 等, 2009. 中国陆地 1:100 万数字地貌分类体系研究[J]. 地球信息科学学报, 11(6): 707-724.]
- Zhou Y Y, Dai W, Wang C, et al, 2023. Spatial resolution of digital elevation models on fine-scale topographic change detection[J]. Mountain Research, 41(3): 446-458.[周毅阳, 代文, 王春, 等, 2023. 数字高程模型空间分辨率对精细尺度地形变化检测的影响[J]. 山地学报, 41(3): 446-458.]

Accuracy Evaluation and Bias Analysis of Multiple High-Resolution DEM Products: A Case Study of Anhui Province

Du Yi¹, Hu Yan¹, Fu Hancong¹, Long Kaihao², Wang Dagang²

(1.School of Energy, Environmental and Geomatics Engineering, Anqing Normal University, Anqing 246133, China;

2.School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Accuracy assessment of Digital Elevation Models (DEMs) is an important prerequisite for ensuring their reliable application in various fields. Given the difficulty of applying traditional ground-based measurement methods to large-scale DEM accuracy assessment, using data from the second-generation Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite (ICESat-2/ATL08) as a reference, combined digital terrain analysis with mathematical statistics to evaluate the quality of eight global DEM products for Anhui Province. The paper also explored the bias characteristics of each product. The results show that FABDEM and GEDTM30 products have the highest overall accuracy, with mean absolute errors of 0.70 m and 0.73 m, respectively. The accuracy of DEM products is significantly affected by topographic factors. For all products, the accuracy is best in high-altitude areas (≥ 500 m), high-slope areas ($\geq 25^\circ$). In addition, the accuracy of DEM products is closely related to the characteristics of the underlying surface, with most products showing lower biases under medium mountainous landforms and farmland cover types. These findings provide scientific guidance for the selection and application of regional DEM products.

Key words: Digital Elevation Model (DEM); Accuracy assessment; Second-generation Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite (ICESat-2); FABDEM; GEDTM30