

全球数字高程产品概述

唐新明¹, 李世金^{1,2}, 李涛¹, 高延东^{1,2}, 张书毕², 陈乾福¹, 张祥¹

1. 自然资源部 国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;

2. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 221116

摘要: 随着世界各国乃至全球信息化和数字化的发展以及全球化热点问题的研究, 高精度、高分辨率全球数字高程产品在广泛的应用领域中扮演着越来越重要的角色。为了方便不同用户根据个人需求选择合适的数据产品, 本文首先论述了数字高程产品的精度衡量指标, 并对其常用的指标进行等价描述, 以便不同数字产品之间的比较分析; 然后从全球化高程数据的获取方式出发, 经由最初的多源数据融合, 到后续基于光学立体摄影测量及合成孔径雷达干涉测量 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 的全球测图, 对其发展的 ETOPO、GTOPO30、GMTED2010、ASTER GDEM、AW3D30、SRTM 及 TanDEM-X DEM 全球化数据产品的主要性质和特点进行详细介绍, 并简单概括了不同数字产品的发展历程。在此基础上, 本文以宁夏回族自治区吴忠市一座山脉为例, 通过定性及定量对比的方式详细分析了 1" 及 3" 经纬度格网分辨率下的数字高程产品。分析表明, 对于采用同一种技术手段生产的数字高程产品, AW3D30 及 ASTER GDEM 均展现出相对丰富的地貌细节特征, 均优于 SRTM 及 TanDEM-X DEM 产品, 但 ASTER GDEM 产品颗粒效应明显, 且产品精度较低; 而 TanDEM-X DEM 是从更高分辨率产品重采样获取, 因此相对平滑; 就数字高程产品的高程精度而言, TanDEM-X DEM 产品精度最高, 其次为 AW3D30 及 SRTM 产品, 均远优于由多源数据融合获取的全球数字产品。

关键词: 全球数字高程产品, 光学立体摄影测量, InSAR, 数字高程产品精度

引用格式: 唐新明, 李世金, 李涛, 高延东, 张书毕, 陈乾福, 张祥. 2021. 全球数字高程产品概述. 遥感学报, 25(1): 167-181

Tang X M, Li S J, Li T, Gao Y D, Zhang S B, Chen Q F and Zhang X. 2021. Review on global digital elevation products. National Remote Sensing Bulletin, 25(1): 167-181 [DOI: 10.11834/jrs.20210210]

1 引言

20 世纪 80 年代开始, 随着地球系统科学的发展以及全球热点问题的研究, 全球数字高程产品需求显著增加, 1988 年首个全球数字高程产品 ETOPO5 发布, ETOPO5 采用多个国家的数据源融合生成, 多数地表高程采用传统的水准或三角测量的方式获取, 数据源、精度和质量均不统一。1999 年, ASTER GDEM 任务启动, 开启了星载全球数字高程产品生产的序幕。2000 年, SRTM 任

务的启动, 则代表了星载 InSAR 技术全球测图能力的开端。现阶段应用最为广泛的两项技术即光学立体摄影测量及 InSAR 技术, 其对应的 ASTER GDEM、AW3D 及 SRTM、TanDEM-X DEM 也是众多全球数字高程产品中的翘楚。

以下主要对目前最常用的几种全球数字高程产品进行详细介绍, 这些产品包括 ETOPO、GTOPO30、SRTM、GMTED2010、ASTER GDEM、AW3D30 及 TanDEM-X DEM。为了便于阅读, 此处给出本文中用到的各缩写的对照表 (表 1)。

表 1 本文所用缩写词的中英对照表

Table 1 Chinese-English bilingual of abbreviations used in this paper

缩写	英文全称	中文全称	缩写	英文全称	中文全称
ADD	Antarctica Digital Database	南极洲数字数据库	AHD	Australian Height Datum	澳大利亚高程基准

收稿日期: 2020-06-19; 预印本: 2020-10-05

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2017YFB0502700); 国家自然科学基金 (编号: 61801136)

第一作者简介: 唐新明, 1966 年生, 男, 研究员, 研究方向为摄影测量与航天测绘的研究与应用。E-mail: tangxinming99@qq.com

通信作者简介: 李世金, 1995 年生, 男, 博士研究生, 研究方向为 InSAR 数据处理与应用。E-mail: Shijin_Li@cumt.edu.cn

续表

缩写	英文全称	中文全称	缩写	英文全称	中文全称
ALOS	Advanced Land Observation Satellite	先进的陆地观测卫星	DSF	Delta Surface Fill	Delta 表面填充
ANUDEM	Australian National University digital elevation model	澳大利亚国立大学数字高程模型	DSM	Digital Surface Model	地球表面模型
ASTER	The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer	先进的星载热发射和反射辐射计	DTED	Digital Terrain Elevation Data	数字地形高程数据
ASTER GDEM	ASTER Global DEM	基于先进的星载热发射和反射辐射计的全球数字高程模型	DTM	Digital Terrain Models	数字地形模型
ASTWBD	ASTER Water Body Dataset	基于先进的星载热发射和反射辐射计的水体数据库	EDC	Earth Resources Observation System Data Center	地球资源观测系统数据中心
AVNIR	Advanced Visible and Near Infrared Radiometer Type	新型可见光和近红外辐射计	EGM96	Earth Gravitational Model 1996	1996 地球引力模型
AW3D	ALOS World 3D	基于先进的陆地观测卫星获取的三维世界产品	EISMINT/SCAR	European Ice Sheet Modeling Initiative/Scientific Committee on Antarctic Research	欧洲冰盖建模倡议/南极研究科学委员会
CE90	Circular Error at 90% Probability	90% 圆概率误差	EOS	Earth Observing System	地球观测系统
CE95	Circular Error at 95% Probability	95% 圆概率误差	ERS	European Remote-Sensing Satellite	欧洲遥感卫星
CEP1	Circular Error Probability	圆概率误差	GDA94	Geocentric Datum of Australia 1994	1994 澳大利亚地心基准
CEP2	Caspian Environment Programme	里海环境规划署	GLOBE	Global Land One-kilometer Base Elevation	全球陆地一公里基准高程
CGIAR-CSI	Consultative Group on International Agricultural Research, Consortium for Spatial Information	空间信息联盟国际农业研究咨询小组	GMTED2010	Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010	全球多分辨率地势高程数据 2010
CIESM	Mediterranean Science Commission	地中海科学委员会	GRS80	Geodetic Reference System 1980	1980 大地参考系统
CVGD28	Canadian Vertical Geodetic Datum 1928	1928 加拿大垂直大地基准	GSHHS	Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shoreline	全球自洽、分层、高分辨率海岸线
DCW	Digital Chart of the World	世界数字图表	IBCAO	International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean	北冰洋国际水深图
DEM	Digital Elevation Model	数字高程模型	ICESat	Ice, Cloud and land Elevation Satellite	冰、云和陆地高程卫星
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	德国航空航天中心	InSAR	Interferometric SAR	合成孔径雷达干涉
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency	日本宇宙航空研究开发机构	NIMA	National Imagery and Mapping Agency	美国国家成像与测绘局

续表					
缩写	英文全称	中文全称	缩写	英文全称	中文全称
JODC	Japan Oceanographic Data Center	日本海洋学数据中心	NMA	National Mapping Agencies	美国国家制图机构
JPL	Jet Propulsion Laboratory	(NASA)喷气推进实验室	NSIDC	National Snow and Ice Data Center	美国国家冰雪数据中心
LE90	Linear Error at 90% Probability	90%线概率误差	ONC	Operational Navigation Chart	业务化航图
LE95	Linear Error at 95% Probability	95%线概率误差	PALSAR	Phased Array Type L-band SAR	L波段相控阵合成孔径雷达
LEP	Linear Error Probability	线概率误差	PRISM	Panchromatic Remote Sensing Instruments for Stereo Mapping	全色立体测图传感器
LIBSR	Leibniz Institute for Baltic Sea Research	莱布尼茨波罗的海研究所	RAMP	Radarsat Antarctic Mapping Project	雷达卫星南极测绘项目
LPDAAC	Land Processes Distributed Active Archive Center	土地进程分布式活动档案中心	RESTEC	Remote Sensing Technology Centre of Japan	日本遥感技术中心
MEaSURES	Making Earth System Data Records for Use in Research Environments	制作用于研究环境的地球系统数据记录	RMSE	Root Mean Square Error	均方根误差
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry	经济产业省	SAR	Synthetic Aperture Radar	合成孔径雷达
MSL	Mean Sea Level	平均海平面	SIO	Scripps Institute of Oceanography	斯克里普斯海洋研究所
NAD83	North American Datum of 1983	1983北美基准	SIR-C/X-SAR	Spaceborne Imaging Radar-C/X-band Synthetic Aperture Radar	C波段星载成像雷达/X波段合成孔径雷达
NASA	U.S. National Aeronautics and Space Administration	美国国家航空航天局	SLA	Shuttle Laser Altimeter	航天飞机激光测高仪
NAVD88	North American Vertical Datum of 1988	1988北美垂直基准	SRTM	Shuttle Radar Topography Mission	航天飞机雷达地形测绘任务
NED	National Elevation Dataset	国家高程数据库	TanDEM-X	TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurements	用于数字高程测量的TerraSAR-X星座
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency	美国国家地理空间情报局	USGS	United States Geological Survey	美国地质调查局
NGDC	National Geophysical Data Center	美国地球物理数据中心	WGS84	World Geodetic System 1984	1984世界大地测量系统
NGVD29	National Geodetic Vertical Datum of 1929	1929国家大地垂直基准			

2 数字高程产品

2.1 数字高程产品

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（李振洪 等，2018），而数字高程数据则是对地形高程信息的数

字化表达，在气候、气象、地形地貌、地质灾害、土壤和水文等各方面拥有着广泛的应用。最常用的涵盖数字高程信息的产品模型为DEM、DTM及DSM。

DEM是通过有限的地形高程数据实现对地面地形的数字化模拟，是一组有序数值阵列形式表

示地面高程的实体地面模型,其反映的是不包含自然及人工地物在内的“裸地”高程信息。DTM是描述各种地貌特性及自然地理要素、与地面相关的社会经济和人文要素等非地貌特性的数字模型,其地貌特性包含高程及坡度、坡向、坡度变化率等各种地貌因子。DEM是DTM的一个子集,在仅指地形高程数据时两者等价,均表示“裸地”高程信息。而DSM则是包含森林、桥梁、建筑物等自然及人工地物高度的地面高程模型,在DEM的基础上进一步添加了地表地物的高程信息。

2.2 数字高程产品精度衡量指标

不同的精度指标源自不同的概率统计方法,其应用学科领域也不尽相同。在测绘领域最常用的精度衡量指标为CEP1、LEP及RMSE。CEP1主要用于军事领域,其在弹道学上的定义是以目标点为圆心划一个圆,如果武器命中此圆的概率为50%,则此圆的半径就是圆概率误差。LEP与CEP1定义类似,统计区域是以LEP数值为长度划得线段。测绘领域常用CE90和LE90分别作为平面精度和高程精度的衡量指标,而CE90和LE90的定义是由CEP1和LEP衍生而来(黄志勇等,2017)。

国内外卫星在发布定位及高程精度时,一般使用CE90和LE90作为精度指标,然而有些研究学者在通过某些参考基准对数据进行质量评价时,通常采用RMSE作为精度指标。为方便进行精度比较,需要对其进行严格的换算,下面将其涉及到的几个常用的精度指标的换算关系制成表2,表3(黄志勇等,2017)。

表2 平面精度指标对应关系

Table 2 The corresponding relationship of different horizontal accuracy indexes

	RMSE X/Y(1 σ)	CE90	CE95
RMSE X/Y(1 σ)	1	2.146	2.448
CE90	0.466	1	1.141
CE95	0.408	0.877	1

表3 高程精度指标对应关系

Table 3 The corresponding relationship of different elevation accuracy indexes

	RMSE (1 σ)	LE90	LE95
RMSE (1 σ)	1	1.645	1.960
LE90	0.608	1	1.191
LE95	0.510	0.839	1

3 全球数字高程产品

3.1 ETOPO

ETOPO是全球数字高程产品的鼻祖。1988年,美国NGDC将美国、西欧、日本、韩国、澳大利亚和新西兰等多个国家和机构提供的高程及水深数据库汇集并重新编制,发布了最高5'经纬度网格的全球陆地和海洋高程产品ETOPO5,这是第一个被广泛使用的全球高程模型。实际上,ETOPO5在海洋、美国、欧洲、日本及澳大利亚区域提供了真实5'经纬度网格分辨率的数据,而在亚洲、南美洲、加拿大北部和非洲等数据匮乏的地区仅提供了1°经纬度网格分辨率的数据(Arabelos, 2000; NOAA, 1988)。由于ETOPO5数据产品是通过已有的数据重新编制而成,因此并没有明确的数据精度。通常情况下,在美国、西欧、日本、韩国、澳大利亚和新西兰地区数据精度最高,其具体精度取决于各数据源。

随后,NGDC于2001年、2006年陆续发布了ETOPO2的两个版本,提供2'经纬度网格的全球陆地和海洋高程,其数据源包括Smith/Sandwell数据库(Smith和Sandwell, 1997)、GLOBE(Hastings和Dunbar, 1999)、IBCAO(Jakobsson等, 2000)、Caspian Sea Bathymetry、Coastal Relief Model(Divins和Metzger, 2008)和Great Lakes Gridded Bathymetry。

2008-08 NGDC又发布了ETOPO1版本(Amante和Eakins, 2009),提供全球范围1'经纬度网格分辨率的陆地和海洋高程,旨在提高ETOPO2 v2的分辨率和精度。ETOPO1分为Ice Surface和Bedrock两个版本,两个版本差别在于处理南极洲和Greenland区域数据时,Ice Surface描述的是冰盖层表面的高程,而Bedrock描述的是基岩的高程。相比较以往版本,ETOPO1融合了更多更优的数据集(数据源如表4所示),将其统一至同一水平及垂直基准下,并利用ArcGIS、FME、MB-System和GMT软件对数据和DEM进行质量检验、处理和网格划分,获取最终全球1'的地形模型。

因部分数据源包含地表地物的高程信息,ETOPO1高程数据产品被统一认定为DSM数据产品,且其均采用对已有制图数据重新编制的生产方法生成,统一将其编制至WGS84水平基准和

MSL垂直基准下。由于数据的多源性，其并未给出明确的精度指标，全球不同区域的精度依赖于取用的相关数据源的精度。但值得说明的是，ETOPO1提供了完整的全球地形和水深覆盖，是目前可以免费使用的唯一提供海洋高程的全球数字高程产品。

表4 ETOPO1数据源
Table 4 The data sources of ETOPO1

组成部分	数据源	机构
海岸线数据	GSHHS	NGDC
	Antarctica Coastline	ADD
水深数据	JODC Bathymetry	JODC
	Gulf of California Bathymetry	NGDC
	Caspian Sea Bathymetry	CEP2
	Mediterranean Sea Bathymetry	CIESM
	SRTM30	NASA
地形数据	GLOBE	NGDC
	Antarctica RAMP	NSIDC
	Measured and Estimated Seafloor Topography	SIO
水深—地形融合数据集	Baltic Sea Bathymetry	LIBSR
	IBCAO	NGDC
	U.S. Coastal Relief Model	NGDC
	Great Lakes Bathymetry	NGDC
基岩数据	Greenland Bedrock	NSIDC
	Antarctica BEDMAP	EISMINT/SCAR

3.2 GTOPO30

为了满足NASA EOS项目和其他全球变化研究项目的需求，USGS EDC开发了30"经纬度网格分辨率的全球DEM产品GTOPO30（Gesch和Larson，1996）。GTOPO30同样采用对已有制图数据重新编制的生产方式，其中每个数据源都需要特定的处理方法和质量保证程序，历经3年，于1996年完成并正式发布。但其仅提供了陆地区域的地表高程，不提供海洋高程。

GTOPO30全球DEM数据源于8个不同的数据库，近80%的陆地区域是基于美国NIMA机构提供的DTED和DCW数据集编制而成，其中DTED数据覆盖率达65%，其余未被DTED和DCW覆盖的陆地区域则主要源于小比例尺数字制图数据库和中等分辨率的国家DEM数据库（Gesch等，1999）。

DTED是水平网格间距为3"的光栅地形数据库，其作为主要数据源聚合到30"的经纬度网格上；DCW是基于1：100万比例尺ONC系列（ONC是全球覆盖范围最大的比例尺基础地图源（Danko，1992））的矢量地图数据库，通过ANUDEM程序（Hutchinson，1989）插值获取格网高程值；剩余未被覆盖的区域则通过小比例尺数字制图数据库和中等分辨率的国家DEM数据库进行补充。数据融合过程中采用加权平均法，每个数据源的权重根据单元格与重叠区域边缘的接近程度确定（Franke，1982），以便将不同数据源的高程差异降到最小，并最终将其统一至WGS84水平基准和MSL垂直基准下。

同ETOPO系列数据产品相似，GTOPO30同样采用对已有制图数据重新编制的生产方法，因此并没有给出统一的精度指标。虽然如此，但在使用时可以根据研究区域参考两个主要数据源的精度指标：DTED数据源高程RMSE约为18 m，对应LE90为30 m（Gesch和Larson，1996），DCW数据源高程RMSE约为93 m，对应LE90为160 m（Gesch，1998）。Gesch（1998）采用覆盖29°S—29°N区域的365000个SLA点高程数据对GTOPO30进行质量评价，对应研究区的整体高程RMSE约为70 m。

3.3 SRTM

生产一套具有统一数据源、统一质量及统一精度的全球数字高程产品，需要使用全球一致的制图技术，若采用传统的测量方法是非常困难且昂贵的。随着SAR技术的问世，发展了两种基于SAR数据的高程反演方法：SAR立体测量和SAR干涉测量。SRTM（Bamler，1999；Farr和Kobrick，1999；Farr等，2007）任务则很好的诠释了InSAR技术在全球测图中的高效性和经济性。由于SAR信号在桥梁、建筑物等地物表面便会产生回波，其获取的高程数据通常包含地表地物的高程信息，因此SRTM属于DSM数据产品。

SRTM是由NASA、NIMA和DLR共同合作的国际项目，于2000-02-11正式启动，历时11 d（Farr等，2007）。其雷达系统采用了1994年航天飞机上成功使用过的SIR-C/X-SAR系统（Stofan等，1995），并配备了两个雷达天线以实现单轨干涉测量，一个位于航天飞机的有效载荷舱内，另

一个位于从舱内延伸 60 m 桅杆的末端。SRTM 包含 C 波段和 X 波段, 由于 X 波段的幅宽较窄, 全球覆盖有限, 因此最终产品以 C 波段数据为主, 其成像模式为 ScanSAR, 幅宽为 225 km, 产品覆盖范围为 56°S—60°N, 约占全球陆地面积的 80% (Van Zyl, 2001), 包括 1"、3"及 30"等不同的经纬度网格分辨率产品。

2003 年, NASA JPL 发布了第一版 SRTM, SRTM v1 是由 InSAR 技术处理后的原始结果组成, 这些数据都是未经编辑的, 在数据质量方面存在一定的问题, 如垂直误差、水域噪声、单像素误差及数据空洞等, 这在水域及高海拔地区尤为明显 (Mouratidis 等, 2010), 尽管如此, 其仍然站在了基于遥感技术获取全球数字高程数据技术和行业的最前端。2006 年, 由 NMA 进行大量编辑工作后发布了 SRTM v2 版本, 又被称为最终版, 解决了部分 v1 版本中存在的问题, 整体展现出了良好的水体边界及海岸线, 但在部分区域仍存在空洞现象 (Mouratidis 等, 2010)。SRTM v2 全分辨率数据产品在美国领土范围内免费提供, 但在其他区域仅提供 3"及 30"分辨率的数据产品。2013–11, LPDAAC 借助 MEASUREs 项目发布了 SRTM v3, 即 SRTM Plus 产品 (NASA 和 LP DAAC, 2013), 通过融合 ASTER GDEM v2、USGS GMTED2010 及 USGS NED 数据填补了所有空洞, 2015–08, NASA 开放了 SRTM v3 1"分辨率全球数字高程产品的免费下载通道。此外, CGIAR–CSI 采用不同的插值算法和辅助 DEM 填补空洞数据, 在 3"分辨率数据产品的基础上发布了 SRTM v4.1 版本 (Jarvis 等, 2008)。

SRTM 数据产品以 WGS84 坐标系为水平参考、以 EGM96 大地水准面为垂直参考, 其精度设计指标为: 绝对高程精度为 LE90 优于 16 m, 相对高程精度 LE90 优于 10 m; 绝对定位精度 CE90 优于 20 m, 相对定位精度 CE90 优于 15 m。然而, 实际研究表明, SRTM 数据产品绝对高程精度 LE90 优于 9 m (Rodriguez 等, 2005), 是迄今为止在覆盖范围、高程精度、公开程度等各方面综合评价最好的全球数字高程数据。

3.4 GMTED2010

随着全球各领域研究对高分辨率数字高程数

据的需求不断增强, 同时新的高程数据获取技术不断涌现, 2010 年 USGS 和 NGA 合作, 通过融合 11 种栅格数据源开发了覆盖 90°S—84°N 范围的 GMTED2010 (Danielson 和 Gesch, 2011), 因采用的数据源包含 DSM 数据, GMTED2010 也被统一认定为 DSM 数据产品。GMTED2010 共包含 7.5"、15"及 30"共 3 种经纬度格网分辨率的全球数字高程产品, 因数据源限制, 在格陵兰岛和南极洲 GMTED2010 仅提供了 30"分辨率的高程数据, 其水平基准面参考 WGS84 坐标系、垂直基准面参考 EGM96 大地水准面。

GMTED2010 是采用具有多坐标系、多基准面和多分辨率特征的 11 种栅格高程数据源汇编而成, 其中 NGA 提供的 1"分辨率的 SRTM DTED2 为主要数据源, 约占陆地面积的 69.92%, 其数据源的详细信息如下表所示 (Danielson 和 Gesch, 2011)。南极洲及格陵兰岛的高程数据主要通过 ERS-1、ICESat 激光测高和 Geosat 雷达测高数据获取。DTED1 主要被用作欧亚大陆 60°N 以北地区数据源, 且与 NED、SPOT5 Reference3D、GEODATA 9 Version2 及 GTOP030 共同作为 SRTM DTED2 的空洞填补数据源 (表 5), 其中 GTOP030 数据最后考虑。CDED 主要被用作加拿大 60°N 以北地区的数据源。NED–Alaska 主要被用作阿拉斯加 60°N 以北地区的数据源。

相比较 GTOP030, GMTED2010 在每种分辨率下还提供了 7 种栅格高程产品: 最小高程、最大高程、平均高程、中间高程、高程标准偏差、系统统计采样、增强特征曲线。此外, GMTED2010 还生成了包含属性字段的详细空间引用元数据, 如坐标、投影信息和原始源高程统计信息等, 以方便用户通过该元数据快速获取指定区域产品的概览信息。其中许多产品将适用于各种区域和大陆应用, 如气候建模、大陆范围内土地覆盖图、提取排水特征进行水文建模、中低分辨率卫星图像数据的几何和辐射校正。

GMTED2010 产品的绝对高程精度通过与 NGA 提供的由光学立体图像提取的全球 160 万个控制点数据集的空间比较进行质量评价, 其中控制点的高程精度 LE90 优于 10 m, 对应 RMSE 约为 6 m, 通过与控制点的比较, GMTED2010 不同分辨率产品下的绝对高程 RMSE 如表 6 所示 (Danielson 和

Gesch, 2011)。若按数据源单独评价, GTOPO30 数据源的 RMSE 值最大, 以 7.5" 分辨率 GMTED 2010 平均高程产品为例, 若不考虑 GTOPO30 数据, 其绝对高程精度将由原来的 27 m 提升至 21 m。

不少研究者也对 GMTED2010 质量进行了相关评价 (Athmania 和 Achour, 2014; Carabajal 等, 2011), 其结果与上述结论基本一致, 且在部分地区单独验证时, 高程精度有显著提升。

表 5 GMTED2010 数据源

Table 5 The data sources of GMTED2010

数据集	陆地面积占比/%	分辨率	水平基准	垂直基准
SRTM DTED2	69.92	1"	WGS84	EGM96
Antarctica satellite radar and laser altimeter DEM	13.80	1 Km	WGS84	WGS84
DTED1	8.71	3"	WGS84	MSL
CDED3	2.26	3"	NAD83	CVGD28
CDED1	2.24	0.75"	NAD83	CVGD28
Greenland satellite radar altimeter DEM	1.79	1 Km	WGS84	WGS84
NED-Alaska	1.01	2"	NAD83	NGVD29
SPOT 5 Reference3D	0.16	15"	WGS84	EGM96
GTOPO30	0.09	30"	WGS84	MSL
NED	0.01	1"	NAD83	NAVD88
GEODATA 9 second DEM version 2	0.0004	9"	GDA94	AHD

表 6 GMTED2010 产品精度

Table 6 Product accuracy of GMTED2010

GMTED2010 产品/"	7.5	15	30
绝对高程精度(RMSE)/m	26—30	29—32	25—42

3.5 ASTER GDEM

基于卫星遥感技术获取全球数字高程数据的系统类型, 除了上述 SRTM 采用的 SAR 系统外, 还包括基于光学立体摄影测量、雷达测高和激光测高的卫星遥感系统, ASTER GDEM 则是一类基于光学立体摄影测量获取全球高程的数据产品, 严格意义上其数据包含了森林植被、建筑物等地表地形的高程, 属于 DSM 数据产品。

ASTER 是一种先进的多光谱成像仪, 1999—12 搭载 NASA 的 Terra 航天器升空。其传感器覆盖了从可见光到热红外的 14 个波段, 具有较高的空间、光谱和辐射分辨率, 一个额外的后向近红外波段提供空间分辨率为 15 m 的立体覆盖, 用以收集地形数据 (Abrams 等, 2002)。基于上述光学立体像对生产了覆盖 83°S—83°N 范围内所有陆地区域的 1" 分辨率的数据产品, 覆盖率约为全球总陆地面积的 99%, ASTER GDEM 的水平基准面参考为 WGS84 坐标系、垂直基准面参考为 EGM96 大地水准面 (Varga 和 Bašić, 2013)。

2009—06—28, NASA 和 METI 发布了 ASTER GDEM v1 数据产品, 采用了约 126 万幅光学立体像对, 通过全自动的生产方式, 并首创无控制点绝对 DSM 数据生产方法, 完成了第一版 GDEM 数据生产处理。随后, 美日联合验证小组评估了 GDEM v1 的准确性, 其整体绝对高程精度 LE95 约为 20 m (Tachikawa 等, 2011), 水平定位精度 CE95 约为 30 m; 经研究发现其存在高纬度地区覆盖不足、云污染、水掩膜及一定的伪影等问题 (Hirt 等, 2010; Nikolakopoulos 等, 2006), 因此只能支撑部分科研应用。

2011—10, NASA 和 METI 在 GDEM v1 的基础上新增了 26 万幅光学立体像对数据, 生产并发布了 ASTER GDEM v2。较 GDEM v1, 其在覆盖范围、空间分辨率和水体掩膜处理精确度等方面有了明显的提升。同 GDEM v1 一样, 由美日联合验证小组评估的 GDEM v2 的绝对高程精度 LE95 约为 17 m, 对应 RMSE 约为 8.7 m (Tachikawa 等, 2011), Rexer 等人对澳大利亚区域的 GDEM v2 数据进行了单独验证, 其精度评价结果与上述结论基本保持一致, RMSE 约为 8.5 m (Rexer 和 Hirt, 2014)。

2019—08—05, NASA 和 METI 共同发布了 ASTER GDEM v3, 在 GDEM v2 的基础上, 又新增了 36 万幅光学立体像对数据, 主要用于减少高程

值空白区域、水域数值异常, GDEM v3 数据在有效覆盖范围、高程精度方面有显著提升。同时, 还发布了一个新的全球数据产品: ASTWBD, 通过该产品可识别所有水体: 海洋、河流和湖泊, 每一幅 ASTER GDEM 数据都会有对应的水体数据。ASTWBD 也是目前基本能够覆盖全球的唯一水体数据。

3.6 AW3D30

基于光学立体摄影测量技术手段获取的全球数字高程产品, 除了上述提及的 ASTER GDEM 外, 还有 ALOS-1 提供的具有更高精度和分辨率的全球化 DSM 数据产品 AW3D。

ALOS-1 作为日本地球观测卫星计划的重要组成部分, 2006-01 发射, 2011-05 JAXA 宣布卫星寿命终结, 其搭载 3 种遥感传感器: 全色立体测图传感器 PRISM、新型可见光和近红外辐射计 AVNIR-2、相阵型 L-波段合成孔径雷达 PALSAR (Osawa, 2004)。基于上述 PRISM 传感器采集的 2.5 m 分辨率的 300 万幅光学立体像对数据, JAXA 生产了覆盖 82°S—82°N 区域范围的 1" 分辨率的全球 DSM 产品 AW3D30, 并向全球用户免费开放下载使用 (Courty 等, 2019)。AW3D30 水平基准面参考 GRS80 坐标系、垂直基准面参考 EGM96 大地水准面 (Caglar 等, 2018)。

2016-05, JAXA 正式发布了第一版 30 m 分辨率的全球化产品 AW3D30 v1.0, 其主要通过对 NTT DATA 和 RESTEC 共同发布的 5 m 分辨率的商业化全球 DSM 数据 AW3D 产品进行重采样获取。AW3D 为全球第一个 5 m 分辨率的全球 DSM 产品, 部分区域可提供 0.5 m、1 m、2 m、2.5 m 等更高分辨率的 DSM 数据产品。因数据重采样方法不同, AW3D30 v1.0 包括采用均值和中值重采样获取的两类产品 (Tadono 等, 2016)。通过全球范围内 5121 个检查点对 AW3D30 v1.0 进行精度评估, 其绝对高程 RMSE 约为 4.4 m, 设计精度为 5 m (Tadono 等, 2016), 在相同分辨率的全球 DSM/DEM 数据产品中处于领先水平。

2017-03, JAXA 发布了补充版 AW3D30 v1.1, 主要通过 DSF 方法运用已有的 DEM 数据对 60°S—60°N 范围内云、雪像素存在的空值进行填充 (Product Description, 2018)。

2018-04, JAXA 发布了改进版 AW3D30 v2.1,

其基础为商业版的第二版 AW3D 产品, 针对此产品纠正了来自 ICESat 参考的绝对偏移误差, 并用升级版的定标方法修正卫星轨道上的相对条带误差, 运用现有的 DEM 数据对 60°S—60°N 范围内云雪像素及水和低相关像素进行了填充, 更新了日本的海岸线数据。由于 AW3D30 v1.1 均值采样和中值采样两类产品的差异不大, AW3D30 v2.1 仅提供了由均值重采样获取的产品 (Product Description, 2018)。

2019-04, JAXA 发布了补充版 AW3D30 v2.2, 运用已有的 DEM 数据对 60°N 以北地区进行了数据补充, 同时继续完成了云雪像素及水和低质量像素填充、海岸线更新 (Product Description, 2020)。

3.7 TanDEM-X DEM

相比较光学立体摄影测量, 基于 InSAR 技术的高程反演方法在多云雾雨等恶劣环境条件下拥有着更独特的优势。前面已经介绍了基于 InSAR 技术一脉的全球数字高程产品 SRTM。然而, 随着后续全球数字高程产品精度的不断提高, SRTM 与之相比略有些无力, 于是 DLR 和 EADS Astrium 合作, 在 2010 年启动了 TanDEM-X 项目, 重新开启 SAR 干涉测量生成全球数字高程数据的新时代。

TanDEM-X 卫星发射于 2010-06, 与 TerraSAR-X 卫星编队飞行, 以构建双站 SAR 干涉模式, 去除时间失相干影响, 提供高精度的全球数字高程产品: TanDEM-X DEM (Krieger 等, 2007)。与 SRTM 产品相同, 其提供了包含森林植被、地表建筑物等地表地物的高程信息, 同样属于 DSM 数据产品。TerraSAR-X/TanDEM-X 于 2014 年年底完成了包括南极洲在内的主要数据采集任务, 其中所有的陆地区域至少两次覆盖, 且在山地、沙漠等困难地区至少四次覆盖 (Tridon 等, 2013)。2016-09 完成了全球高程数据的处理, 并发布了覆盖全球范围的 0.4" 分辨率的标准产品 (Zink 等, 2017)。相比较以往的全局高程数据产品, TanDEM-X DEM 是首个以统一精度和无间隙方式获取的全球全覆盖数字高程产品。

随后, 基于上述标准产品, 通过均值重采样的方法又获取了 1" 及 3" 分辨率的全球 TanDEM-X DEM 产品, 并将 3" 分辨率产品向全球用户免费开放。TanDEM-X DEM 以 WGS84-G1150 坐标系为水

平基准参考，同样以其 WGS84-G1150 椭球面为垂直基准参考（Wessel，2018）。

TanDEM-X DEM 的绝对定位精度 CE90 为 10 m，绝对高程精度 LE90 为 10 m，坡度小于 20% 时相对高程精度（相对高程精度仅限于 0.4"分辨率产品，1"及 3"分辨率产品未标定。）LE90 为 2 m、大于 20% 时为 4 m（Wessel，2018）。DLR 使用全球

近 1.5 千万个 ICESat 点对 TanDEM-X DEM 进行实际质量评估，其整体绝对高程精度 LE90 约为 3.5 m；除冰、森林覆盖区以及沙漠外，其绝对高程精度 LE90 达到了 0.88 m（Rizzoli 等，2017；Wecklich 等，2017）。

根据上文所述，将目前常用的免费公开的全球数字高程产品统计如表 7 所示。

表 7 全球数字高程产品及其主要参数

Table 7 Global digital elevation products and the main parameters

产品名称	发布时间	分辨率	表面模型 (DSM/DTM)	覆盖范围	水平 基准	垂直 基准	绝对高程精度		技术手段	下载网址
							评价 指标	值 /m		
ETOPO1	2008	1"	DSM	90°S—90°N 180°W—180°E	WGS84	MSL	视数据源精度而定		数据融合 (16 种数据源)	URL1
GTOPO30	1996	30"	DTM	90°S—90°N 180°W—180°E	WGS84	MSL	RMSE	70	数据融合 (8 种数据源)	URL2
SRTM	v1:2003	1"	DSM	56°S—60°N 180°W—180°E	WGS84	EGM96	LE90	标称:16	InSAR	v1/v2:URL3 v3:URL4
	v2:2006	3"						实际:9		
	v3:2013	30"								
GMTED2010	2010	7.5", 15", 30"	DSM	90°S—84°N 180°W—180°E	WGS84	EGM96	RMSE	7.5":26—30 15":29—32 30":25—42	数据融合 (11 种数据源)	URL2
ASTER GDEM	v1:2009	1"	DSM	83°S—83°N 180°W—180°E	WGS84	EGM96	LE95	v1:20	光学立体摄影 测量	v2:URL5 v3:URL6
	v2:2011							v2:17		
	v3:2019									
AW3D30	v1.0:2016	1"	DSM	82°S—82°N 180°W—180°E	GRS80	EGM96	RMSE	标称:5	光学立体摄影 测量	URL7
	v1.1:2017							实际:4.4		
	v2.1:2018									
	v2.2:2019									
TanDEM-X DEM	2016	3"	DSM	90°S—90°N 180°W—180°E	WGS84- G1150	WGS84- G1150	LE90	标称:10 实际:3.5	InSAR	URL8

注：URL1：<http://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/wcs-client/>
URL2：<http://earthexplorer.usgs.gov/>
URL3：<https://dds.cr.usgs.gov/srtm/> 或 <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
URL4：https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=C1000000240-LPDAAC_ECS 或 <https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl1v003/>
URL5：http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=%E2%9C%93&spatial_map=satellite&spatial_type=rectangle
URL6：https://search.earthdata.nasa.gov/search/granules?p=C1575726572-LPDAAC_ECS&fi=ASTER
URL7：<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm>
URL8：<https://download.geoservice.dlr.de/TDM90/files/>

4 全球数字高程产品综合分析

为了更直观的对比分析不同全球数字高程产品的效果，以位于宁夏回族自治区吴忠市的一座山脉为例进行横向定性对比分析，并将其统一至相同水平基准及垂直基准下开展定量分析。研究区域的详细范围为 37.17°N—37.43°N、106.15°E—106.41°E，高程范围约为 1250—2650 m。以下分别

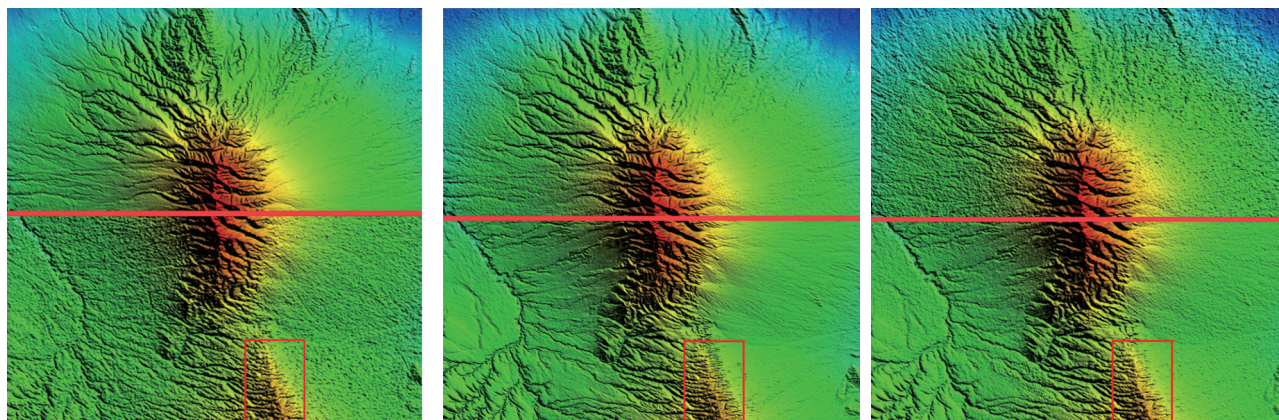
采用常用的 1"及 3"分辨率的高程数据产品进行对比，方便使用者根据不同的需求选取合适的数据源。

4.1 1"分辨率数据对比

原始数字高程数据为 1"分辨率的产品包括 SRTM、ASTER GDEM 及 AW3D30，对数据源进行镶嵌融合及裁剪处理，并采用 Global Mapper 进行地图渲染处理，其不同产品同图对比如图 1 所示，3 种高分辨率数据产品对地形均能较好地表达。但

通过对红框标记区域的细致对比可以发现,在地势地貌的细节信息展示上, AW3D30 及 ASTER GDEM 要略丰富于 SRTM。然而 ASTER GDEM 存在

明显的颗粒效应,尤其是相对平坦区域,一些主要的地形细节被颗粒效应所掩盖,难以细致地表达地形起伏。



(a) AW3D30(上)vs ASTER GDEM(下) (b) SRTM(上)vs AW3D30(下) (c) ASTER GDEM(上)vs SRTM(下)
(a) AW3D30 (up) vs ASTER GDEM (down) (b) SRTM (up) vs AW3D30 (down) (c) ASTER GDEM (up) vs SRTM (down)

图1 SRTM、ASTER GDEM、AW3D30 1''分辨率产品对比

Fig.1 Comparison of 1'' resolution product for SRTM, ASTER GDEM and AW3D30

由于 SRTM 是 2003 年的数据产品,虽然后续不断更新,但是其主要是利用现有数据源填补空洞数据,并未对主要数据源进行更改,因此较 ASTER GDEM 及 AW3D30 而言,缺乏一定的实时性。ASTER GDEM 获取的数据源虽然较新,但在丘陵及平原地区存在明显的颗粒效应,一定程度上掩盖了真实的地形信息。AW3D30 获取的数据源则最新,但是其 1'' 分辨率高程数据是由更高分辨率的数字高程产品采用均值重采样的方式获取,因此可能会出现些许的平滑现象,但整体而言要优于前两者。根据前文所述的产品标称精度,将其统一至 LE90 精度指标下的绝对高程精度对比如表 8 所示,其中 AW3D30 产品精度是三者中最优的。

表 8 绝对高程精度 LE90 对比

Table 8 Comparison of absolute elevation accuracy LE90

	GTOPO30	SRTM	GMTED2010	ASTER GDEM	AW3D30	TanDEM-X DEM
LE90/m	115.13	9	41.12—67.43	14.27	7.24	3.5

为进一步分析三者之间的差异,对其产品高程进行差值 (ΔH) 处理,并采用最小值、最大值、中值、平均值及标准差指标进行评价分析;此外,还定义了高程差值区间,对其较差分布所在范围比例进行统计分析,结果如表 9 所示。对比

产品高程差值可以发现, AW3D30 与 SRTM 产品高程差异最小,其差值均值仅为 1 m,且约 95% 的差值小于 10 m;相反, ASTER GDEM 与前两个产品有着显著的差异,其高程差值小于 10 m 的仅占 60% 左右。

4.2 3''分辨率数据对比

除 1'' 高分辨率的数字高程数据外,最常用的还包括 3'' 分辨率产品,下面针对目前直接发布的 3'' 分辨率产品: SRTM3 v2、TanDEM-X DEM 及降采样至同等分辨率的 ASTER GDEM、AW3D30 进行对比分析,其不同产品同图对比如图 2 所示。

同 1'' 分辨率产品对比, 3'' 分辨率数据存在明显的细节损失现象。从 3'' 分辨率的数字高程数据角度分析, AW3D30 及 ASTER GDEM 在沟壑等地貌细节信息同样较为丰富,略优于 SRTM3 v2 及 TanDEM-X DEM 数据,而 TanDEM-X DEM 数据整体更为平滑, ASTER GDEM 颗粒效应仍十分明显。从数据的实时性上看, TanDEM-X DEM 和 AW3D30 的数据最新,并且两者公布的免费产品都有一个共同的特性,都是从更高分辨率产品采用重采样的方式获取。从表 8 所示的统一精度指标下的高程精度分析, TanDEM-X DEM 数据精度要明显优于其余产品, ASTER GDEM 数据精度相对最差。

表9 不同数字高程产品之间的差异

Table 9 Differences between different global digital elevation products

	$\Delta H/m$					ΔH 分布/ %		
	最小值	最大值	中值	平均值	标准差	$ \Delta H <10\text{ m}$	$10\text{ m}< \Delta H <20\text{ m}$	$ \Delta H >20\text{ m}$
AW3D30-ASTER GDEM	-45	60	8	7.1805	8.3892	57.6	37.5	4.91
AW3D30-SRTM	-31	46	1	1.0940	4.2434	94.88	4.88	0.23
SRTM-ASTER GDEM	-49	62	6	6.0865	7.9796	63.62	33.09	3.29

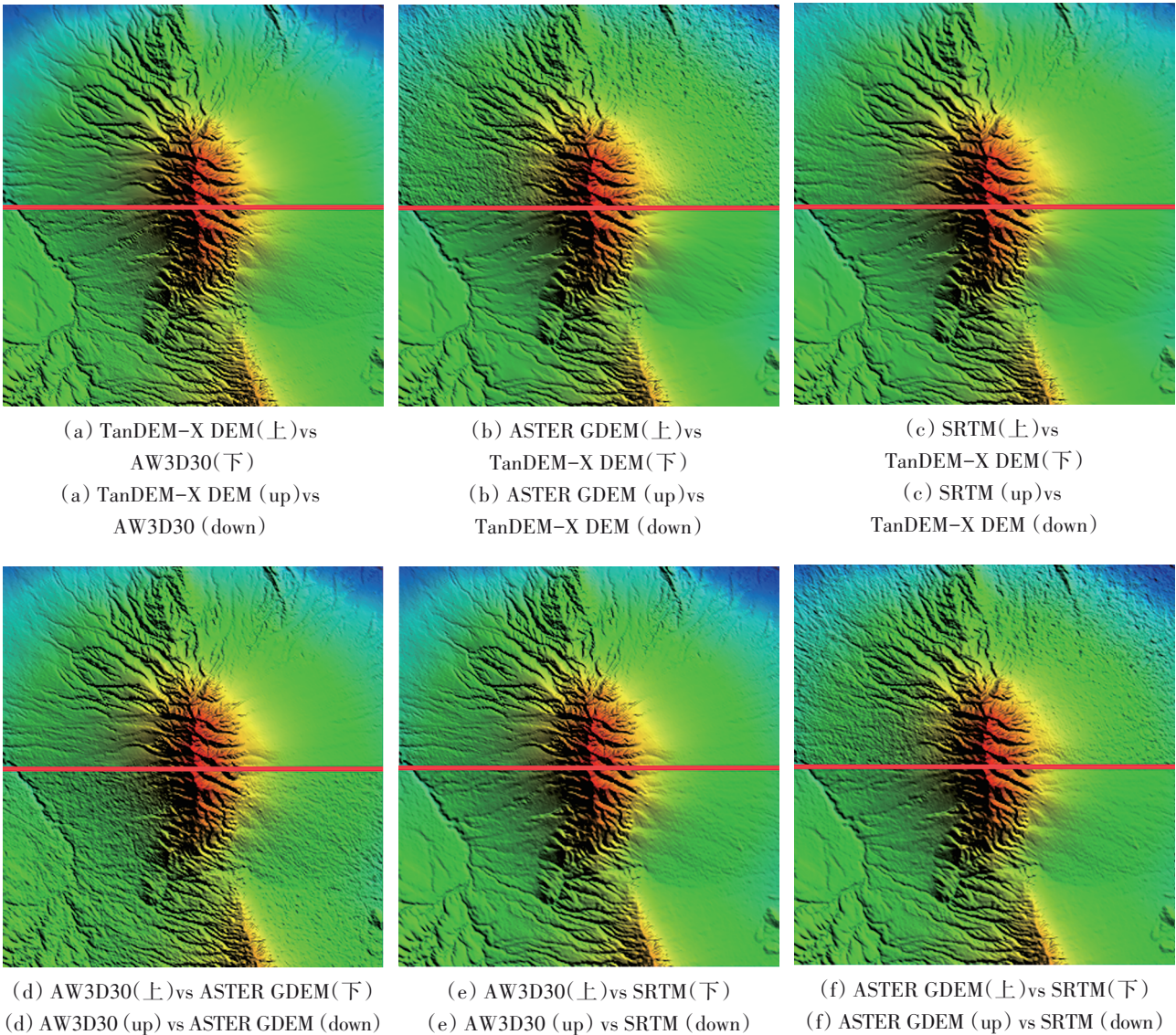


图2 SRTM、ASTER GDEM、AW3D30、TanDEM-X DEM 3''分辨率产品对比

Fig.2 Comparison of 3'' resolution product for SRTM, ASTER GDEM, AW3D30 and TanDEM-X DEM

同样，将其不同数据产品统一至WGS84水平基准及以WGS84椭球面为参考的垂直基准下，开展高程数据产品之间的差异分析，其不同评价指标的计算结果如表10所示。对比指标结果发现，TanDEM-X DEM与SRTM产品高程差异最小，高差标准差仅2.35 m，且高程差值近100%小于10 m；其次差异较小的为TanDEM-X DEM与AW3D30产品、AW3D30与SRTM产品，其高差标准差分别约为3.49 m、4.56 m，且小于10 m的高程差值均能占到93%以上；ASTER GDEM与其余高程数据产品

的差异都较大,高差标准差均高于7.5 m。从表8所示的标称精度分析,其不同数据产品之间的差异性基本与上述分析一致,而TanDEM-X DEM与

SRTM产品差异最小的原因部分可归结于采用了相同的技术手段获取DEM。

表 10 不同数字高程产品之间的差异
Table 10 Differences between different global digital elevation products

	$\Delta H/m$					ΔH 分布/%		
	最小值	最大值	中值	平均值	标准差	$ \Delta H <10\text{ m}$	$10\text{ m}< \Delta H <20\text{ m}$	$ \Delta H >20\text{ m}$
TanDEM-X DEM-AW3D30	-29.0825	34.4396	-2.3721	-2.4768	3.4931	96.45	3.40	0.15
TanDEM-X DEM-ASTER GDEM	-43.3430	56.5437	5.3371	5.0422	7.7480	72.36	24.77	2.87
TanDEM-X DEM-SRTM	-15.9539	26.7006	-1.2795	-1.0494	2.3509	99.71	0.29	0
AW3D30-ASTER GDEM	-52	64	8	7.5209	8.7900	55.81	37.98	6.20
AW3D30-SRTM	-30	34	1	1.4273	4.5563	93.53	6.10	0.37
SRTM-ASTER GDEM	-43	55	6	6.0396	7.7890	64.30	32.69	3.02

鉴于其余数字高程产品的分辨率相对较低,在统一至同一分辨率时,其地势地貌的细节信息将更为模糊,因此从直观分析的角度并不能发现明显差异,当应用低分辨率高程数据时,可将侧重点放在高程精度方面,据此选择合适的数据源。但值得注意的是,GTOPO30是这些数据产品中唯一的表示裸地高程的DTM数据,其余均为包含地表地物高程的DSM数据。

5 结 语

本文从全球化各项目研究对全球数字高程产品需求逐渐扩大的研究现状出发,简单介绍了常用的数字高程产品类型及高程数据精度衡量指标,并给出了几种常用的精度指标之间的等价关系;从数据产品获取方式、相关技术研究、产品版本更新及特点的角度出发,详细阐述了目前常用且公开免费的ETOPO、GTOPO30、SRTM、GMTED2010、ASTER GDEM、AW3D30及TanDEM-X DEM全球化数字高程产品;最后以宁夏回族自治区吴忠市一座山脉为例,通过定性及定量对比的方式详细分析了不同产品之间的差异,以便于不同用户根据个人需求选择合适数据产品。

随着星载对地观测技术的不断发展,全球数字高程产品的各种指标也在随之攀升,应用领域已经从最初的全球大面积变化研究逐步拓展到城市甚至局部小面积区域高程相关应用研究,应用行业也从传统的测绘、国土资源管理、气候与大气治理、环境保护拓展到通信网络规划设计、智能交通系统设计、矿产资源、建筑与土木工程设

计、减灾防灾、国防与国家安全等领域。另外,全球化的快速推进,也带来了管理视角的变化,中国自然资源的全球化、南北极问题、全球生物圈问题、全球水循环问题等各类全球性事物的参与必然离不开全球性地理信息框架的建设和更新,这对国产的自主可控的数字高程产品提出了迫切的需求。

继资源三号01、02星之后,高分七号卫星已成功发射,中国的测图能力已经从1:5万跃升至1:1万。除此之外,高分七号还搭载了面向单点高精度高程测量的激光载荷,可为国产数据提供高程控制。中国以干涉为主任务的陆探一号SAR卫星(Li等,2020;Jin等,2019)也即将发射,它面向1:5万比例尺地形图测绘,可结束中国全境覆盖高程数据,特别是多云多雨地区长期存在的来源不一致、精度不一致、质量不一致的问题,为中国的全球数字高程产品生产获取奠定良好的技术基础。

参考文献(References)

Abrams M, Hook S and Ramachandran B. 2002. ASTER User Handbook. Version 2. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory

Amante C and Eakins B W. 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA [DOI: 10.7289/V5C8276M]

Arabelos D. 2000. Intercomparisons of the global DTMs ETOPO5, TerrainBase and JGP95E. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 25(1): 89-93 [DOI: 10.1016/S1464-1895(00)00015-6]

Athmania D and Achour H. 2014. External validation of the ASTER

- GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI- SRTM v4.1 free access digital elevation models (DEMs) in Tunisia and Algeria. *Remote Sensing*, 6(5): 4600-4620 [DOI: 10.3390/rs6054600]
- Bamler R. 1999. The SRTM mission: a world-wide 30 m resolution DEM from SAR interferometry in 11 days//Photogrammetric Week. Heidelberg: Herbert Wichmann: 145-154
- Caglar B, Becek K, Mekik C and Ozendi M. 2018. On the vertical accuracy of the ALOS world 3D-30m digital elevation model. *Remote Sensing Letters*, 9(6): 607-615 [DOI: 10.1080/2150704x.2018.1453174]
- Carabajal C C, Harding D J, Boy J P, Danielson J J, Gesch D B and Suchdeo V P. 2011. Evaluation of the global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010) using ICESat geodetic control//Proceedings Volume 8286, International Symposium on Lidar and Radar Mapping 2011: Technologies and Applications. Nanjing, China: SPIE [DOI: 10.1117/12.912776]
- Courty L G, Soriano-Monzalvo J C and Pedrozo-Acuña A. 2019. Evaluation of open-access global digital elevation models (AW3D30, SRTM, and ASTER) for flood modelling purposes. *Journal of Flood Risk Management*, 12(S1): e12550 [DOI: 10.1111/jfr3.12550]
- Danielson J J and Gesch D B. 2011. Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010). Affiliation: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey.
- Danko D M. 1992. The digital chart of the world. *GeoInfo Systems*, 2: 29-36
- Divins D L and Metzger D. 2008. NGDC coastal relief model. National Geophysical Data Center, National Oceanic and Atmospheric Administration, US Department of Commerce
- Farr T G and Kobrick M. 1999. The shuttle radar topography mission: a global DEM. *American Geophysical Union*, 45(2): 37-55
- Farr T G, Rosen P A, Caro E, Crippen R, Duren R, Hensley S, Kobrick M, Paller M, Rodriguez E, Roth L, Seal D, Shaffer S, Shimada J, Umland J, Werner M, Oskin M, Burbank D and Alsdorf D. 2007. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45 (2): (RG2004 [DOI: 10.1029/2005RG000183])
- Franke R. 1982. Smooth interpolation of scattered data by local thin plate splines. *Computers and Mathematics with Applications*, 8 (4): 273-281 [DOI: 10.1016/0898-1221(82)90009-8]
- Gesch D B. 1998. Accuracy assessment of a global elevation model using Shuttle Laser Altimeter data//Sensing and Managing the Environment. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing. Seattle, WA, USA: IEEE, 2: 840-842 [DOI: 10.1109/IGARSS.1998.699601]
- Gesch D B and Larson K S. 1996. Techniques for development of global 1-kilometer digital elevation models//Pecora Thirteen, Human Interactions with the Environment-Perspectives from Space. Sioux Falls, South Dakota: [s.n.]
- Gesch D B, Verdin K L and Greenlee S K. 1999. New land surface digital elevation model covers the Earth. *EOS Transactions American Geophysical Union*, 80(6): 69-70 [DOI: 10.1029/99EO00050]
- Hastings D A and Dunbar P K. 1999. Global land one-kilometer base elevation (GLOBE) digital elevation model, documentation, volume 1.0. Key to Geophysical Records Documentation (KGRD) 34. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center, 325: 80303-3328
- Hirt C, Filmer M S and Featherstone W E. 2010. Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57(3): 337-347 [DOI: 10.1080/08120091003677553]
- Huang Z Y, Wang S T, Li J, Xin G D, Huang L Y and Zhang Q Q. 2017. The different expressions of the positioning accuracy of "TH-01" satellite//The 8th China Satellite Navigation Conference. Shanghai (黄志勇, 王淑婷, 李晶, 辛国栋, 黄令勇, 张倩倩. 2017. “天绘一号”卫星定位精度的不同表述//第八届中国卫星导航学术年会. 上海)
- Hutchinson M F. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106(3/4): 211-232 [DOI: 10.1016/0022-1694(89)90073-5]
- Jakobsson M, Cherkis N, Woodward J, Macnab R and Coakley B. 2000. New grid of Arctic bathymetry aids scientists and mapmakers. *EOS Transactions American Geophysical Union*, 81(9): 89-96 [DOI: 10.1029/00EO00059]
- Jarvis A, Reuter H I, Nelson A and Guevara E. 2008. Hole-filled SRTM for the globe Version 4. CGIAR-CSI SRTM 90m Database.
- Jin G D, Liu K Y, Deng Y K, Sha Y, Wang R, Liu D C, Wang W, Long Y J and Zhang Y W. 2019. Nonlinear frequency modulation signal generator in LT-1. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(10): 1570-1574 [DOI: 10.1109/lgrs.2019.2905359]
- Krieger G, Moreira A, Fiedler H, Hajnsek I, Werner M, Younis M and Zink M. 2007. TanDEM-X: a satellite formation for high-resolution SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 4(11): 3317-3341 [DOI: 10.1109/tgrs.2007.900693]
- Li C, Zhang H, Deng Y K, Wang R, Liu K Y, Liu D C, Jin G D and Zhang Y Y. 2020. Focusing the L-band spaceborne bistatic SAR mission data using a modified RD algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(1): 294-306 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2936255]
- Li Z H, Li P, Ding T and Wang H J. 2018. Research progress of global high resolution digital elevation models. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43(12): 1927-1942 (李振洪, 李鹏, 丁咚, 王厚杰. 2018. 全球高分辨率数字高程模型研究进展与展望. 武汉大学学报(信息科学版), 43(12): 1927-1942) [DOI: 10.13203/j.whugis20180295]
- Mouratidis A, Briole P and Katsambalos K. 2010. SRTM 3" DEM (versions 1, 2, 3, 4) validation by means of extensive kinematic GPS measurements: a case study from North Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 31(23): 6205-6222 [DOI: 10.1080/01431160903401403]

- NASA, LP DAAC. 2013. NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Version 3.0 (SRTM Plus) Product Release. Land Process Distributed Active Archive Center. National Aeronautics Space Administration
- Nikolakopoulos K G, Kamaratakis E K and Chrysoulakis N. 2006. SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (21): 4819-4838 [DOI: 10.1080/01431160600835853]
- NOAA, NGDC. 1988. Data Announcement 88-MGG-02. Digital relief of the Surface of the Earth. Boulder, Colorado: NOAA
- Osawa Y. 2004. Optical and microwave sensor on Japanese Mapping Satellite-ALOS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 35: 309-312
- Product Description. 2018. ALOS global digital surface model (DSM) ALOS World 3D-30m (AW3D30) version 2.1//Earth Observation Research Center and Japan Aerospace Exploration Agency
- Product Description. 2020. ALOS global digital surface model (DSM) ALOS world 3d-30m (AW3D30) version 2.2//Earth Observation Research Center and Japan Aerospace Exploration Agency
- Rexer M and Hirt C. 2014. Comparison of free high resolution digital elevation data sets (ASTER GDEM2, SRTM v2.1/v4.1) and validation against accurate heights from the Australian National Gravity Database. *Australian Journal of Earth Sciences*, 61(2): 213-226 [DOI: 10.1080/08120099.2014.884983]
- Rizzoli P, Martone M, Gonzalez C, Wecklich C, Tridon D B, Bräutigam B, Bachmann M, Schulze D, Fritz T, Huber M, Wessel B, Krieger G, Zink M and Moreira A. 2017. Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 132: 119-139 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.08.008]
- Rodriguez E, Morris C S, Belz J E, Chapin E C, Martin J M, Daffer W and Hensley S. 2005. An assessment of the SRTM topographic products. Technical Report JPL D-31639
- Smith W H F and Sandwell D T. 1997. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, 277 (5334): 1956-1962 [DOI: 10.1126/science.277.5334.1956]
- Stofan E R, Evans D L, Schmullius C, Holt B, Plaut J J, van Zyl J, Wall S D and Way J. 1995. Overview of results of spaceborne imaging radar-C, X-band synthetic aperture radar (SIR-C/X-SAR). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(4): 817-828 [DOI: 10.1109/36.406668]
- Tachikawa T, Kaku M, Iwasaki A, Gesch D B, Oimoen M J, Zhang Z, Danielson J J, Krieger T, Curtis B and Haase J. 2011. ASTER global digital elevation model version 2-summary of validation results. Tokyo: Earth Remote Sensing Data Analysis Center
- Tadono T, Nagai H, Ishida H, Oda F, Naito S, Minakawa K and Iwamoto H. 2016. Generation of the 30 M-Mesh Global Digital Surface Model by Alos Prism//The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Prague, Czech Republic, XLI-B4: 157-62 [DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B4-157-2016]
- Tridon D B, Bachmann M, Schulze D, Ortega-Míguez C, Polimeni M D, Martone M, Böer J and Zink M. 2013. TanDEM-X: DEM acquisition in the third year era. *International Journal of Space Science and Engineering*, 1(4): 367-381 [DOI: 10.1504/IJSPACESE.2013.059270]
- Van Zyl J J. 2001. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. *Acta Astronautica*, 48(5/12): 559-565 [DOI: 10.1016/S0094-5765(01)00020-0]
- Varga M and Bašić T. 2013. Quality assessment and comparison of Global Digital Elevation Models on the territory of Republic of Croatia. *Kartografija i Geoinformacije*, 12(20): 4-17
- Wecklich C, Gonzalez C and Rizzoli P. 2017. TanDEM-X height performance and data coverage//2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Fort Worth, TX, USA: IEEE: 4088-4091 [DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8127898]
- Wessel B. 2018. TanDEM-X ground segment-DEM products specification document. Earth Observation Center
- Zink M, Moreira A, Bachmann M, Rizzoli P, Fritz T, Hajnsek I, Krieger G and Wessel B. 2017. The global TanDEM-X DEM - a unique data set//2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Fort Worth, TX, USA: IEEE: 906-909 [DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8127099]

Review on global digital elevation products

**TANG Xinming¹, LI Shijin^{1,2}, LI Tao¹, GAO Yandong^{1,2}, ZHANG Shubi², CHEN Qianfu¹,
ZHANG Xiang¹**

1. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Beijing 100048, China;

2. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

Abstract: Digital elevation products are the digital expression of terrain and elevation information, which has been widely utilized in the fields of climate, meteorology, topography, geological disasters, soil, and hydrology. Meanwhile, the development of information and

digitalization all over the world and the research of major global issues have emphasized the increasingly becoming important role of high-precision and -resolution global digital elevation products. Therefore, the public free digital elevation products are comprehensively described and analyzed in this study to facilitate different users to select appropriate data products depending on their personal requirements.

This study first discusses the different measurement indexes of digital elevation products' accuracy. Moreover, the equivalence relationship between the common measurement indexes is derived to compare and analyze different digital elevation products. The global elevation data acquisition modes are explored first. The main properties and characteristics of ETOPO, GTOPO30, GMTED2010, ASTER GDEM, AW3D30, SRTM, and TanDEM-X DEM global data products are introduced in detail through the initial data fusion and the subsequent global mapping based on optical stereo photogrammetry and interferometric synthetic aperture radar techniques. The development history of different products is also briefly described. The parameters and elevation accuracy among the aforementioned digital elevation products are then summarized and comparatively analyzed. The results are shown in Table 7 and 8, respectively.

On this basis, the different data products under 1" and 3" resolution for a mountain located in Wuzhong City, Ningxia Hui Autonomous Region are analyzed in detail by means of qualitative and quantitative comparison. The visual analysis shows that the AW3D30 and ASTER DEM products exhibit the relatively rich landform detail features, and they are both superior to the SRTM and TanDEM-X DEM elevation products. However, the particle effects obviously appear in the ASTER GDEM products, and the precision of these products is low. Among these products, the TanDEM-X DEM products are relatively smooth because they are derived by resampling the high-resolution products. In terms of elevation accuracy, TanDEM-X DEM products have the highest accuracy and are followed by AW3D30 and SRTM products. These products are greatly superior to the global digital elevation products obtained by multi-source data fusion. The quantitative difference analysis results of different products are consistent with the conclusion mentioned above.

In general, adopting the advanced satellite remote sensing technology to obtain elevation data with uniform data source, quality, and precision will be the development trend of global digital elevation products. Furthermore, the application field of digital elevation products with high precision and resolution obtained by advanced techniques will be expanded from the initial change research of global large area to the application research related to elevation of urban and even local small area. Therefore, domestic digital elevation products, which can be controlled independently, are urgently demanded. Meanwhile, the popular domestic LuTan-1 SAR satellite with the interference as main task will soon be launched, and it will provide a good technical foundation for the production and acquisition of domestic global digital elevation products.

Key words: global digital elevation product, optical stereo photogrammetry, InSAR, digital elevation product's accuracy

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2017YFB0502700); National Natural Science Foundation of China (No. 61801136)