

DOI:10.13203/j.whugis20180295



文章编号:1671-8860(2018)12-1927-16

全球高分辨率数字高程模型研究进展与展望

李振洪^{1,2} 李鹏^{2,3} 丁咚^{2,3} 王厚杰^{2,3}

1 英国纽卡斯尔大学工程学院,英国纽卡斯尔,NE1 7RU

2 中国海洋大学海洋地球科学学院海底科学与探测技术教育部重点实验室,山东青岛,266100

3 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室,山东青岛,266061

摘要:简要介绍了数字高程模型(digital elevation model, DEM)的起源与定义,根据 4 种不同的观测平台分类介绍了 DEM 数据获取方法,给出目前国际上发布的高分辨率全球 DEM 的主要性质和特点。重点介绍了 9 大类全球 DEM,分析了 DEM 质量评估相关的评定方法和精度指标。论述了 DEM 在地质灾害监测、海岸带脆弱性分析方面的应用,以美国地质勘探局和德国航空太空中心正在开展的 DEM 项目为例,讨论了高精度、高分辨率全球同质 DEM 和地形测深高程模型的最新需求,最后总结展望全球高分辨率 DEM 的发展趋势。

关键词:数字高程模型;合成雷达干涉测量;光学立体像对;地质灾害;质量评估

中图分类号:P237;P208

文献标志码:A

地球表面的地球物理过程通常受到地形的控制或强烈影响,大尺度自然灾害与气候环境变化相关的研究(如地震、火山、滑坡、地面沉降、洪水淹没等)均需要区域或全球尺度的精密地形信息。构建具有长期稳定大地测量参考框架(包含海岸带浅水测深数据)的高质量、高分辨全球数字高程模型(digital elevation model, DEM)是全球地球观测系统(Global Earth Observation System of Systems, GEOSS)过去十年的主要任务之一,对其正在发挥其作用的环境、气候相关的社会福利领域(societal benefit areas, SBAs)具有极其重要的价值。

本文主要介绍全球高分辨率 DEM 的主要特征、数据获取与质量评估方法,分析其在地质灾害与海岸带等方面的应用,讨论其最新需求与挑战及未来发展趋势。

1 DEM 的起源和定义

地形(topography)是指地球表面的高低起伏

形态,高程是描述地表起伏形状的最基本的几何量。美国麻省理工学院摄影测量学实验室的 Miller 和 Laflamme^[1]通过摄影测量技术采样地形数据,用于解决计算机辅助道路设计相关的工程问题,最早提出了数字地形/地面模型(digital terrain model, DTM)的概念,即利用一个任意坐标场中选择大量已知 X、Y、Z 的坐标点对连续地面进行简单统计表示,得到描述地球表面形态多种信息空间分布特征的有序数值阵列。基于高程数据得到的派生产品,如坡度、坡向、曲率等地貌因子,均可以作为 DTM 的第三维分量用于描述地形特征。

仅用于描述地面高程信息,采用有限的离散点高程实现对地形曲面的数字化模拟,以数字形式按照一定结构组织表示实际地形特征空间分布的 DTM 模型称为 DEM。DEM 原本是 DTM 的一个子集^[2-3]。

由于地球表面被各种自然或人工地物覆盖,难以直接获取精确的地形形态。特别是基于摄影

收稿日期:2018-07-25

项目资助:国家自然科学基金(41806108,41606066);国家重点研发计划(2016YFA0600903);山东省自然科学基金(ZR2016DB30);中国博士后科学基金(2016M592248);青岛市自主创新计划应用基础研究(16-5-1-25-jch);中央高校基本科研业务费(201713039);青岛市博士后应用研究;英国自然环境研究理事会项目(COMET: come30001, LICS: NE/K010794/1, CEDRRIC: NE/N012151/1);中国海洋大学绿卡人才工程科研经费。

第一作者:李振洪,博士,教授,主要研究方向为影像大地测量及其在地质灾害、精准农业与人工建筑物稳定性监测方面的应用。Zhenhong.Li@newcastle.ac.uk

通讯作者:李鹏,博士。pengli@ouc.edu.cn

测量与遥感技术观测得到的 DEM,通常包含了森林植被、建筑物等地物分布形态,此类 DEM 又称为数字地表模型(digital surface model, DSM)。

给定平面坐标 (X_i, Y_i) 、相应离散点高程 Z_i (规则或不规则),DEM 可以采用如下函数表示地面起伏形态的数字集合:

$$V_i = (X_i, Y_i, Z_i), i = 1, 2 \cdots n \quad (1)$$

若平面位置为规则网格形式,式(1)可以简化为一维向量序列:

$$\{Z_i, i = 1, 2 \cdots n\} \quad (2)$$

20 世纪 90 年代以来,DEM 被列为中国国家空间数据基础设施(National Spatial Data Infrastructure, NSDI)和数字地球空间数据框架(Digital Geospatial Data Framework, DGDF)的标准产品,同时也是地理国情监测的重要产品之一^[4-7]。作为地学分析与建模的基础数据(如海岛礁及周边复杂环境^[8]),DEM 逐步替代等高线成为地形描述与分析的重要数据源;同时,数字地球和智慧地球的发展和建设促进了 DEM 与遥感学科等的一体化进程^[9-10]。

2 DEM 数据获取方法

根据式(1)可知,建立 DEM 实现地表重建的前提是对连续地球表面进行有限离散点的精确采样和三维坐标测量^[2]。目前,DEM 数据获取方法主要包括野外地面测量、地形图数字化、航空航天摄影测量与遥感(激光雷达扫描(light detection and ranging, LiDAR)、合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)、立体光学影像)等,本文根据观测平台的差异来分类介绍 DEM 数据来源。

2.1 地基模式

地基模式主要指野外地面测量方法。

1)传统地面测量方法,如全球导航卫星系统静态或动态测量、全站仪测量等。这类方法采用单点采集方式耗时费力,但是观测精度较高,主要适用于小范围、大比例尺测图任务,服务于工程项目等。

2)地面三维激光扫描仪(如加拿大 Optech、奥地利 Rigel、瑞士 Leica 等)采用无合作目标激光测距仪与角度测量系统组成自动化快速测量系统,可以快速获得海量点云数据,有效数据采集速率可达几十万点/s,可以构建高精度(mm 级)、高分辨率 DTM^[11]。点云数据采集包括场地踏勘、控制网布设、靶标布设、扫描作业等步骤,点云数

据处理包括配准、分析、优化压缩、分层、等高线拟合、三维建模、纹理分析等方面。另外,集成惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)与全球导航卫星系统等组合单元的车载移动测图系统可以支持激光扫描仪进行动态数据采集^[12]。

3)基于数字化仪通过交互式跟踪数字化或半自动扫描数字化和栅格矢量化,可以实现已有地形图要素的数字化,是目前常见的 DEM 数据采集方法之一。由于原始地形图、数字化、栅格化、插值等步骤均存在误差,该方法效率和精度相对较低,但对历史记录或存档信息提取而言,可能是唯一选项^[13-14]。

2.2 船载模式

广泛的海底地质过程导致了海底深度和粗糙度的变化,进而影响了海洋环流、生物多样性分布、海洋油气资源及地震、海啸等。由于高分辨率海底测图成本高、效率低、难度大,导致全球海底地形仍然存在许多空白区域^[15]。

船基海底地形测量是目前最常用的高分辨率海底地形测量技术。传统的船载海底地形测量主要是借助船载单波束、多波束回声测深仪开展水深测量,同步开展潮位、定位和声速测量。目前,多波束全覆盖测深技术已经成为海洋测量的常规技术,传统的点线式海底地形测量模式已发展成面状的全覆盖作业模式^[16-17]。

无人船、水下载人潜航器、水下自治机器人以及水下遥控机器人等平台可以集成单波束、多波束测深仪等水深测量系统,结合水下声学定位技术能够开展高效、高精度、高分辨率的水下地形测量^[17-19]。

2.3 机载模式

机载模式主要包括航空摄影测量、机载激光 LiDAR、机载激光测深系统、机载 InSAR 以及无人机等方法。

1)航空摄影测量方法是利用大幅面数码航空相机拍摄的立体像对重建地表三维立体模型、量测三维空间坐标的方法,经历了模拟法、解析法、数字化 3 个发展阶段^[20-21]。目前,基于数字摄影测量工作站(如 Pixel Factory NeoTM、VirtuoZoTM 等)的全数字自动化或者交互式方法相对比较成熟,可用于获取高精度、高保真 DEM^[22]。

2)机载 LiDAR 扫描系统是集激光测距仪、全球导航卫星系统、惯性导航系统、CCD(charge-coupled device)相机、计算机数据处理等于一体的新型测量技术,可以获得地面高密度三维位置点云数据,通过多次回波滤波、分类与建模可以同

时得到 DSM 和 DTM^[23-27]。机载 LiDAR 技术在活断层识别、滑坡监测、海岸带脆弱性分析等领域得到了广泛应用^[28-30]。

3) 机载激光测深系统(Laser Airborne Depth Sounder, LADS 或 Airborne LiDAR Bathymetry, ALB)分别向海面发射两种波段的激光,其中红外波段被海面反射,蓝绿波段透射海水后反射,利用激光传播时间差得到相对瞬时海面的相对深度,根据潮汐资料和潮汐模型获得瞬时海面高程和海底绝对高程。该方法适合用于近岸、浅海、岛礁等近海浅水区域的水深测量,最小探测深度可达 0.15 m,最大测深在 50 m 左右,测点密度可达 dm 级^[16-17, 31-32]。目前,可以采用单一蓝绿波段激光(如美国 EAARL 系统、奥地利 RIEGL VQ 系统等)开展沿岸陆地与浅水的一体化无缝地形测量^[23, 32]。

4) 机载 InSAR 技术适用于测绘困难地区(如多云、雾地区)的高精度、高分辨率、实时地表信息获取^[33-35]。美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)喷气动力实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)最早研发了一款机载干涉合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)测图系统(AIRSAR),又称为 Topographic SAR (TOPSAR),1988—2004 年搭载于 DC-8 喷气式飞机之上,具备 P/L/C 波段全极化能力,幅宽为 10 km,距离向分辨率分别为 7.5 m/3.75 m/1.875 m^[36-37]。最具标志性意义的是,2000 年美国航天飞机雷达地形测绘任务(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)利用机载 InSAR 技术,仅 11 d 便获取了全球 80% 陆地 1"分辨率的三维地形信息。

5) 无人机(unmanned aerial vehicles, UAV)或微型无人机(mini-UAV, mUAV)也可用于搭载数码相机、SAR、LiDAR 等设备,特别适用于小范围、低成本项目(如局部侵蚀、沉积、城市规划等)的 DEM 获取^[38-39]。近年来发展起来的应用于构造地貌、林业、农业、考古等领域的运动重建技术(structure from motion, SfM)仅需要一台搭载于传统航空摄影测量平台或 UAV、风筝、气球、竿子等平台的相机对感兴趣区域的影像进行重叠拍摄,基于点云后处理软件即可生成高精度、高分辨率 DEM^[40-41]。

2.4 星载模式

星载模式主要包括卫星遥感立体影像、星载 InSAR、雷达测高、激光测高 LiDAR 等,有利于获取全球范围质量一致的 DEM。

1) 高分辨率光学立体影像近年来已成为生成 DEM 产品(特别是全球 DEM)的首要数据来源^[42-43],例如法国 SPOT 系列、美国 Terra AS-TER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)、日本 ALOS(Advanced Land Observing Satellite) PRISM(Panchromatic Remote Sensing Instrument for Stereo Mapping)、中国资源三号(ZY-3)等^[44-46]。目前,超高分辨率(very high resolution, VHR)光学遥感卫星已经越来越普遍,例如 WorldView-3/4(0.31 m)、WorldView-1/2(0.46 m)、GeoEye-1(0.46 m)、Pleiades-1A/B(0.5 m)、KOMPSAT-3/3A(0.7/0.55 m)、Quickbird(0.65 m)、Gaofen-2(0.8 m)、TripleSat(0.8 m)、IKONOS(0.82 m)、SkySat-1/2(0.8 m)等。

2) 星载 InSAR 技术一般为重复轨道干涉测量模式,主要面向地表形变监测应用。高精度 DEM 的生成容易受时间、空间去相关及大气延迟和轨道误差等影响。双星编队分布式 SAR 系统(例如德国航空太空中心发射的 TerraSAR-X 与 TanDEM-X 卫星)能够有效克服上述问题,已经得到了覆盖全球、空间分辨率 12 m 的 WorldDEMTM,在精度方面(相对精度 2 m、绝对精度 4 m)超过了其他全球 DEM。

3) 卫星 LiDAR 是利用卫星平台搭载激光测高仪,向地面发射激光脉冲并接收回波信号,根据激光往返时间、卫星轨道等信息获得足印点(footprint)高程的方法,是获取月球及小行星三维地形地貌的主要方法^[47]。NASA 于 2003 年发射的 ICESat 卫星(Ice, Cloud, and land Elevation Satellite)搭载有唯一有效载荷 GLAS(Geoscience Laser Altimeter System),是首个全球连续观测的星载 LiDAR 传感器,可以提供全球地表高程及反演森林植被特征。GLAS 每隔 170 m 左右生成约 70 m 直径的地面激光光斑,其地表高程观测精度为 15 cm^[48]。其后继卫星 ICESat-2 于 2018 年 9 月发射,搭载唯一载荷 ATLAS(Advanced Topographic Laser Altimeter System)以每隔 70 cm 进行高程观测。另外,2010 年 4 月欧空局发射的新一代测高卫星 CryoSat-2 搭载的合成孔径干涉雷达高度计(Synthetic Aperture Interferometric Radar Altimeter, SIRAL)则特别适合极地冰盖与海冰的高精度高程监测^[49-51]。

4) 基于卫星测高重力异常与船测水深数据^[15, 52-54],或者利用多光谱或 SAR 卫星遥感影

像构建反演模型^[17, 55],也可以实现大面积海底地形的反演,但在反演精度、空间分辨率等方面仍有待提高。

3 全球 DEM

早期大范围 DEM(全球、大陆或区域尺度)主要基于已有地图资料的重新编译和数据融合,空间分辨率较为粗糙(一般大于 1 km),例如 ETOPO5(earth topography five minute grid)、TerrainBase、GLOBE(Global Land One-km Base Elevation)、GTOPO30(Global 30-arc-second Digital Elevation Models)等,但在众多领域仍然发挥了重要作用。目前常见的高分辨率全球 DEM 的生成主要得益于全球卫星遥感、卫星测高、船载测深等资料的获取,例如 SRTM、ASTER GDEM、AW3D30(ALOS World 3D-30 m)、WorldDEMTM、NEXTMAP 等。表 1 给出了主要全球 DEM 数据的分辨率、高程基准、存储格式等特征,所有产品水平基准均为 WGS84。

3.1 ETOPO 系列

1)ETOP05。1988年5月,美国国家海洋与大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)国家地球物理数据中心(National Geophysical Data Center, NGDC)发布了第一个全球陆地和海底高程数据集 ETOPO5,其经纬度格网为 5' (约 10 km),在缺少海底观测数据的亚洲、南美洲、非洲等区域,其真实空间分辨率在 1°左右。

2)ETOP02。2001年9月,NGDC发布了经纬度格网 2' (约 4 km)的 ETOPO2,该版本融合了船载声学测量与卫星测高结果以及来自 GLOBE 项目的陆地新高程数据。

3)ETOP01。2008年8月,NGDC发布了 ETOPO2 v2 的改进版本 ETOPO1,用于支持海啸预警与建模、海洋环流建模与地球可视化,其经纬度格网为 1' (约 1.8 km),可以获取两个不同格网版本:南极和格陵兰冰原顶部冰表面(ice surface)和冰盖底部基岩(bedrock)。

3.2 GTOPO30

为了满足 NASA 地球观测系统(Earth Observing System, EOS)及其他全球变化研究项目对高质量全球 DEM 产品的需求,1996年,美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)发布了全球范围空间分辨率约 1 km(经纬度格网为 30'')的 GTOPO30^[56]。由于当时没有

全球覆盖的一致数据源,GTOPO30是由8种不同栅格、矢量地形数据源编译而成,其主要数据源为美国国家地理空间情报局(National Geospatial-Intelligence Agency, NGA)生产的数字地面高程数据(digital terrain elevation data, DTED)和世界数字地图(digital chart of the world, DCW)。该数据发布后,成为 GLOBE DEM 和 ETOPO2 等其他全球高程产品和大尺度应用的首要数据源。

3.3 GMTED2010

在 GTOPO30 发布之后,全球多数地区有了新高程数据(如 DTED、SRTM、ICESat等),USGS 与 NGA 利用 11 种栅格高程数据源(主要数据源为 1" SRTM DTED2)融合得到了全球多分辨率地面高程数据(global multi-resolution terrain elevation data 2010, GMTED2010),是 GTOPO30、GLOBE 及其他 30"分辨率全球 DEM 替代版本。该产品具有 30''(约 1 km)、15''(约 500 m)和 7.5''(约 250 m)等 3 个不同分辨率,基于聚合方法(aggregation method)得到 7 类高程子产品(最小值、最大值、均值、中值、标准差、系统二次抽样、断线强调),范围主要覆盖 84°N~56°S 陆地部分^[57]。

3.4 SRTM DEM

1)SRTM v1&.v2.1。2000年2月,NASA 联合 NGA、DLR、意大利航天局开展了 SRTM,利用 C 波段 InSAR 技术收集了 60°N~56°S 陆地地形信息^[58]。SRTM DEM 在美国本土分辨率为 1'' (约 30 m),在全球其他地区则为 3'' (约 90 m)。该数据是 InSAR 形变监测、重力场建模等应用的关键数据源^[59]。

2)SRTM v4.1。2008年9月,国际农业研究磋商组织下属的空间信息协会(Consultative Group on International Agricultural Research, Consortium for Spatial Information, CGIAR-CSD)发布了 3''分辨率的全球无缝高程数据集 SRTM v4.1,该版本采用高级插值与补洞方法,与之前版本相比,高程质量有显著改进^[60]。

3)SRTMGL3 (Global 3'' V003)。2013年11月,NASA 发布了 3''分辨率的 SRTM v3(SRTM Plus),使用了 ASTER GDEM v2、USGS GMTED2010 或美国国家高程数据集(National Elevation Dataset, NED)填补数据空洞^[61]。

4)SRTMGL1 (Global 1'' V003)。2014年9月,NGA 宣布 1''分辨率的 SRTM 数据逐步向全球用户免费开放。自 2015年7月起,中国大陆用

户可以免费下载。

5) X-SAR SRTM。2010 年 12 月, DLR 发布了 X 波段获取的 1" 分辨率 SRTM DEM, 覆盖全球约 40% 陆地表面, 高程精度约为 6 m。由于采用高分窄幅模式观测, X-SAR 影像条带间存在大量数据空隙^[62]。

3.5 ASTER GDEM

2009 年 6 月, 日本经济、贸易与工业部 (Ministry of Economy, Trade, and Industry, METI) 与 NASA 合作发布了覆盖全球 83°N~83°S 陆地、空间格网为 1" 的 ASTER GDEM v1。该数据利用了约 150 万景 ASTER 光学影像, 通过立体像对相关 (stereo-correlation) 技术得到^[63-64]。

2011 年 10 月, METI 与 NASA 发布了 ASTER GDEM v2, 新版本重新处理了 2000—2010 年约 150 万景 ASTER 影像 (同时增加了 2008 年 9 月以后的 26 万景新影像), 在受云持续覆盖的区域采用 SRTM v3 等数据源替代缺失数据, 通过减小归一化相关配准窗口、校正高程系统偏差 (-5 m)、提升水体探测能力等措施改进其空间分辨率和高程精度^[65]。

3.6 AW3D 系列

日本宇航局 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 与日本遥感技术中心 (the Remote Sensing Technology Center of Japan, RESTEC)、日本 NTT DATA 公司自 2014 年起合作开发了 AW3D 系列产品。

1) AW3D Standard。基于 ALOS 卫星搭载的 PRISM 进行三维立体像对地形观测, 是首个覆盖全球陆地的 5 m 分辨率 DSM/DTM, 高程精度 RMSE (root mean square error) 为 5 m;

2) AW3D Enhanced。基于数字地球 (DigitalGlobe) 公司的 WorldView 立体像对生成 3 种空间分辨率 (0.5 m/1 m/2 m) 的 DSM/DTM, 无地面控制点高程精度 RMSE 为 2 m, 另外提供高精度正射影像、城市、建筑物、电信、机场等栅格或矢量产品;

3) AW3D30。2016 年 5 月发布了基于 5 m 分辨率的 AW3D 标准产品得到的覆盖全球 82°N~82°S 的 30 m 分辨率 DSM 数据集 AW3D30 Version 1^[66], 2018 年 4 月发布了基于 ICESat 高程校正及条带误差改正后的新版本 Version 2.1。

3.7 WorldDEM™ 系列

WorldDEM™ 系列产品是由 DLR 与法国空中客车防务与空间公司 (Airbus Defense and Space, ADS) 采用公私伙伴关系 (Public Private

Partnership, PPP) 联合发布, 基于 TanDEM-X 与 TerraSAR-X 雷达卫星组成双站 InSAR 观测模式, 在 2010 年 12 月至 2014 年 6 月对全球所有陆地进行了至少两次完整覆盖。DLR 负责卫星在轨运行、数据获取与干涉处理, ADS 负责 WorldDEM™ 数据的商业化。该系列主要包括如下产品。

1) WorldDEM_{core}。该产品是未经任何后处理精化的干涉输出结果 DSM, 包含了地表建筑物、基础设施与植被, 也包含了 InSAR 相关的误差源、空洞等;

2) WorldDEM™。该产品是对地形 (如异常值移除、空洞填充、噪声滤波、海岸带负值抬升等)、水文 (如海洋、湖泊、河流、岛屿、海岸线、桥、堤坝、船只、海洋平台等) 和机场进行编辑、精化后的 DSM;

3) WorldDEM DTM。该产品是经过剔除建筑物和植被之后不含有地物特征的裸地地形。

3.8 NEXTMAP 系列

美国 Intermap 公司利用多传感器数据源 (机载 InSAR、星载 InSAR、地面测量等) 推出了全球多尺度无缝商业 DSM 与 DTM 三维高程数据服务 NEXTMAP。该系列主要包括如下产品。

1) NEXTMAP ONE™。基于 2016 至今的星载 InSAR 资料, 可提供全球所有国家和地区 1 m 空间分辨率的 DSM 与 DTM, 绝对高程精度 RMSE < 1 m;

2) NEXTMAP 5™。利用 Intermap 公司机载 InSAR 平台, 获取了全球超过 40 个国家 5 m 空间分辨率的 DSM 和 DTM, 绝对高程精度 RMSE 为 1 m;

3) NEXTMAP World 10™。利用多源数据获取方式 (机载、星载、地基等), 可提供全球范围 1/3 弧秒 (约 10 m 空间分辨率) 的 DSM 和 DTM, 绝对高程精度 RMSE < 10 m;

4) NEXTMAP World 30™。通过校正、配准、滤波、融合多源数据集, 得到覆盖全球范围 1 弧秒的 DSM (约 30 m 空间分辨率), 基于 ASTER GDEM、SRTM 等数据源填补数据空洞和改正内部误差, 利用上百万个独立控制点 (如 ICESat、地面控制点、机载数据等) 对全部数据 (包括水体与海岸线) 进行三维建模校正, 绝对高程精度 RMSE < 10 m。

3.9 AIRBUS Elevation 系列

ADS 公司利用不同分辨率、不同数据来源的影像产品得到了多尺度 DEM 产品。

1) Elevation1。基于 Pleiades 立体像对和三

线阵光学立体影像资料生成的具有 1 m 格网、1.5 m 高程精度的 DEM。

2)Elevation4。基于 Pleiades 立体像对和三线阵光学立体影像资料生成的具有 4 m 格网、2 m 高程精度的 DEM。

3)Elevation8。基于 SPOT6 立体像对和三线阵光学立体影像资料生成的具有 8 m 格网、

3 m 高程精度的 DEM。

4)Elevation10。基于 TerraSAR-X 雷达卫星数据生成的具有 10 m 格网、5 m 高程精度的 DEM。

5)Elevation30。主要基于 SPOT5 光学卫星数据及 TerraSAR-X 雷达卫星资料进行漏洞填补得到的具有 30 m 格网、8 m 高程精度的 DEM。

表 1 主要全球 DEM 产品汇总

Tab.1 Summary of Major Global DEM Products

DEM 产品	发布时间/年	发布机构	空间范围	格网大小	官方高程精度 RMSE/m	获取方法	海底地形	免费	垂直基准	空值 Voids	存储格式
ETOPO1	2008	NGDC	90°S ~ 90°N	1'	—	STDM30 GTOPO30 海道测量 卫星测高 等数据融合	有	是	海平面	No voids	NetCDF GeoTIFF XYZ Binary
GTOPO30	1996	USGS	90°S ~ 90°N	30"	66	DTED 地图数字化 等数据融合	无	是	平均海平面	-9 999	Binary
GMTED 2010	2010	USGS NGA	90°S ~ 84°N	30" 15" 7.5"	25~42 29~32 26~30	SRTM SPOT5 Reference3D 等数据融合	无	是	EGM96	-32 768	ArcGrid GeoTIFF Shapefile
SRTMGL1	2014	NASA	56°S ~ 60°N	1"	16 (LE90)	机载 C-Band InSAR	无	是	EGM96	No voids	HGT
SRTMGL3	2013	NASA	56°S ~ 60°N	3"	16 (LE90)	机载 C-Band InSAR	无	是	EGM96	No voids	HGT
SRTMGL30	2013	NASA	60°S ~ 90°N	30"	16 (LE90)	机载 C-Band InSAR	无	是	EGM96	No voids	HGT
SRTM30_ PLUS v11	2014	UCSD	90°S ~ 90°N	30"	—	SRTM30 GTOPO30 船载测深 雷达高度计	有	是	EGM96	+9 999	NetCDF
SRTM15_ PLUS v1	2014	UCSD	90°S ~ 90°N	15"	—	SRTM ASTER 船载测深 雷达高度计	有	是	EGM96	+9 999	NetCDF
GEBCO_ 2014 Grid	2014	IHO IOC	90°S ~ 90°N	30"	—	船载测深 卫星重力	有	是	EGM96	+9 999	NetCDF
SRTM v4.1	2008	CGIAR CSI	56°S ~ 60°N	3"	16 (LE90)	机载 C-Band InSAR	无	是	EGM96	-32 768	GeoTIFF
SRTMX	2010	DLR	56°S ~ 60°N	1"	16 (LE90)	机载 X-Band InSAR	无	是		-32 767	DTED2
ASTER GDEM2	2011	METI NASA	83°S ~ 83°N	1"	20 (LE95)	星载 ASTER 立体像对	无	是	EGM96	-9 999	GeoTIFF
AW3D Standard	2014	NTT RESTEC	82°S ~ 82°N	5 m	5	ALOS PRISM 立体像对	无	否	EGM96	-9 999	GeoTIFF
AW3D Enhanced	2014	NTT RESTEC	82°S ~ 82°N	0.5 m 1 m 2 m	2	WorldView 立体像对	无	否	EGM96	-9 999	GeoTIFF

续表

DEM 产品	发布时间/年	发布机构	空间范围	格网大小	官方高程精度 RMSE/m	获取方法	海底地形	免费	垂直基准	空值 Voids	存储格式
AW3D30 v2.1	2018	JAXA	82°S ~ 82°N	1"	3	ALOS PRISM 立体像对	无	是	EGM96	-32 767	GeoTIFF
World DEM _{core}	2016	DLR Airbus	90°S ~ 90°N	12	4 (LE90)	TanDEM-X InSAR	无	否	EGM2008	-32 767	GeoTIFF
World DEM TM	2016	DLR Airbus	90°S ~ 90°N	12	4 (LE90)	TanDEM-X InSAR	无	否	EGM2008	-32 767	GeoTIFF
WorldDEM DTM	2016	DLR Airbus	90°S ~ 90°N	12	10 (LE90)	TanDEM-X InSAR	无	否	EGM2008	-32 767	GeoTIFF
NEXTMAP ONE TM	2016	Intermap	90°S ~ 90°N	1 m	1 (LE90)	多传感器	无	否	EGM96	-32 767	GeoTIFF
NEXTMAP 5 TM	2016	Intermap	90°S ~ 90°N	5 m	1.65 (LE90)	InSAR LiDAR	无	否	EGM96	-32 767	GeoTIFF
NEXTMAP World 10 TM	2016	Intermap	90°S ~ 90°N	10 m	8 (LE90)	多传感器	无	否	EGM96	-32 767	GeoTIFF
NEXTMAP World 30 TM	2016	Intermap	90°S ~ 90°N	1"	8 (LE90)	多传感器	无	否	EGM96	-32 767	GeoTIFF
Elevation1	2014	Airbus	90°S ~ 90°N	1.5	<10 (LE90)	Pleiades 立体像对	无	否	EGM96	-32 767	GeoTIFF
Elevation4	2014	Airbus	90°S ~ 90°N	2	<10 (LE90)	Pleiades 立体像对	无	否	EGM96	-32 767	GeoTIFF
Elevation8	2014	Airbus	90°S ~ 90°N	3	<10 (LE90)	SPOT6&7 立体像对	无	否	EGM96	-32 767	GeoTIFF
Elevation10	2014	Airbus	90°S ~ 90°N	5	<10 (LE90)	SPOT6&7 立体像对	无	否	EGM96	-32 767	GeoTIFF
Elevation30	2014	Airbus	90°S ~ 90°N	8	<10 (LE90)	SPOT5 立体像对 TerraSAR-X InSAR	无	否	EGM96	-32 767	GeoTIFF

注:国际海道测量组织(IHO);政府间海洋学委员会(IOC)

4 DEM 质量评估

已有许多学者研究了 DEM 质量相关的评估方法及高精度 DEM 建模方法^[2, 67-71],系统分析了 DEM 误差的影响因素(如采样、插值等)与精度建模等,本文不再赘述。本文简要介绍全球 DEM 质量评估通常采用的评定方法与精度指标。

4.1 评定方法

DEM 精度是 DEM 面上的点高程与其真值的接近程度^[2],可以通过描述系统偏差评估其系统误差,通过估计高差的离散情况来评估其随机误差。

全球 DEM 通常给出了该产品官方声称的全局精度指标,但由于 DEM 数据质量在区域尺度上存在空间变化,因此需要对其定量评估并谨慎

使用。本文给出 DEM 质量评估的一般思路^[65, 72-78]。

1) 利用目视检查和剖面图, 初步识别 DEM 的系统误差和随机误差, 了解 DEM 的可见细节程度。

2) 利用连续运行参考站(Continuously Operating Reference Station, CORS), 或者高精度(cm~dm 级)实时动态测量(real-time kinematic, RTK), 或者 ICESat 地面参考点位数数据来估计 DEM 绝对高程误差。参考点的高程精度需要至少优于 DEM 高程精度 3 倍, 通过双线性内插方法对参考点进行网格插值。

3) 利用参考 DEM(如 LiDAR、机载 InSAR 或者其他已有高精度 DEM 资料), 以像素所在的面状区域为基础, 评估待测 DEM 的高程精度。

4) 由于绝对高程误差与局部地貌坡度通常存在强相关, 土地覆盖是 DEM 精度的关键影响因素, 因此需要将 DEM 与参考数据按照坡度或者坡向、地物覆盖类型进行划分, 用于确定高程误差空间分布与地形、地物的相关性。

4.2 精度指标

假定 DEM 高程误差服从正态分布, 高程精度可用如下指标进行衡量。

1) 误差均值

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - H_{\text{ref}}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta h_i \quad (3)$$

2) 标准差

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta h_i - \hat{\mu})^2} \quad (4)$$

3) RMSE

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta h_i^2} \quad (5)$$

在非开阔区域, 由于滤波与插值误差导致激光扫描或数字摄影测量技术得到的 DEM 误差较少服从正态分布^[79], 因此需要采用高程误差直方图和分位数 Q-Q 图诊断其是否服从正态分布。

考虑到系统偏差 μ 和标准差 σ 等精度估计会受到异常值和误差非正态分布的影响, 因此 DEM 精度评估还需要考虑如下稳健统计方法^[79-80]。

1) 中位数

$$\hat{Q}_{\Delta h} (0.5) = m_{\Delta h} \quad (6)$$

2) 绝对偏差中位数(median absolute deviation, MAD)

$$\text{MAD} = \text{median}_j (|\Delta h_j - m_{\Delta h}|) \quad (7)$$

3) 归一化绝对偏差中位数(normalized median, NMAD)

$$\text{NMAD} = 1.4826 \times \text{median}_j (|\Delta h_j - m_{\Delta h}|) \quad (8)$$

4) 90%分位数绝对偏差(LE90)

$$\text{LE90} = \hat{Q}_{|\Delta h|} (0.9) \quad (9)$$

NMAD 通常用于估计重尾分布标准差 σ , 对于正态分布(68.3%置信区间)而言, $\text{NMAD} = \sigma$, 对于 90%置信区间的线性误差, $\text{LE90} = 1.65\sigma$ 。

5 DEM 应用

高分辨率、高精度 DEM 数据在科学、工程、军事、社会经济等领域发挥着基础重要作用, 特别是在地质灾害、全球变化与应对等方面, 例如滑坡监测、冰川变化、海岸带淹没等^[81]。

5.1 地质灾害应用

地质灾害通常定义为对生命、财产和环境具有潜在风险的地质状态和过程, 包括自然灾害(如地震、滑坡、火山、海啸和洪水等)与人类活动相关的灾害(如地下水抽取、矿产开采等导致的地面沉降、水污染、大气污染等)^[82]。

滑坡灾害是一种重大的地质灾害, 每年造成大量人员伤亡和经济财产损失, 近年来其发生率随着气候变化和城市化的扩张而显著增加^[83-84]。高分辨率、高精度 DEM 是滑坡识别、滑坡监测、滑坡灾害分析与预测等阶段的关键数据集, 可以用于茂密植被地区的滑坡现象与滑坡机制目视判读、滑坡目录制图、滑坡形变量求解、环境因子与触发因子分析等研究^[29]。

目前, 高分辨率卫星遥感影像或 LiDAR 技术被广泛用于高地质风险区域的宏观地物覆盖、裸地 DEM 和地表形变获取。为了更好地融合不同观测平台的数据与模型, 需要进一步结合地面实测数据(如地面三维激光扫描、地基 InSAR、近景摄影测量等)和局部传感器网络开展 DEM 数据的验证与补充^[84]。

5.2 海岸带应用

根据联合国政府间气候变化专业委员会 2014 年发布的第 5 次气候变化评估报告, 过去 110 a 间全球海平面上升了 19 cm, 在全球变暖大背景下, 海平面上升仍呈加速趋势, 预计到 2100 年全球海平面最大升幅为 0.98 m^[85]。

海平面上升会淹没滨海低地, 加剧风暴潮、洪涝、海岸侵蚀、海水入侵与土壤盐渍化等灾害, 威胁沿海基础设施安全^[86-88]。沿海城市在城市规划和重大基础设施的设计参数制定中, 需要充分考虑海平面上升等气候变化增量因素。过去二十多

年,欧美国家及中国已经针对沿海地区开展了海平面上升影响评估和脆弱区划研究,根据经济社会发展程度采取防护、后退和顺应等策略应对海平面上升^[89-91]。

高程数据是确定海岸带地区自然灾害脆弱性的主要变量,特别是与洪水和海平面上升相关的淹没灾害^[92-93],但是对于 DEM 高程不确定性对海平面上升评估结果的影响研究仍然较少。因此,需要了解底层高程数据质量,才能正确建模潜在影响,进而得到可靠的灾害评估结果^[89]。

6 DEM 最新需求与发展趋势

本文以 USGS 和 DLR 正在开展的两类 DEM 项目为例,分析全球 DEM 领域的最新需求与发展趋势。

6.1 高精度、高分辨率全球同质 DEM

对于全球部分国家或地区而言,仅有来自多种不同数据源、不同数据处理方法得到的粗糙、不一致或者不完整的 DEM。过去十年间,DLR 致力于开发全球空间分辨率 12 m×12 m、相对高程精度 2 m 的 TanDEM-X DEM (即 WorldDEM™),可以为众多科学与商业应用提供不可或缺的全局同质 DEM^[80-81]。

TanDEM-X 卫星采用波长 3.1 cm 的 X 波段干涉 SAR,仅能穿透少部分森林树冠(大约树冠以下 10%~20%左右,该比例取决于森林类型)。因此,该 DEM 可代表陆地上层表面模型(DSM),包含如密集森林植被上层、城市顶层、建筑物屋顶等高程,而 DTM 描述的是植被下部的地形变化。尽管 TanDEM-X 采用不同基线多个相同季节观测相同区域两次以上,对于存在厚植被的农作物地区仍然无法有效描述。利用卫星遥感或激光测高(如 ICESat)等方法编译得到的森林高度图,移除 SRTM、ASTER GDEM 或 TanDEM-X DSM 的树高偏移量,有望得到全球裸地 DEM^[94]。

Tandem-L 卫星将作为 TanDEM-X 卫星的扩展任务,采用波长为 24 cm 的 L 波段 SAR 信号,能够穿透植被获取 DSM,利用极化干涉 SAR(PolInSAR)技术获取植被下部地形(DTM),基于相同波长与观测几何的双基 SAR 模式获取与 TanDEM-X 相同空间分辨率和精度的全球 DEM 产品^[95]。该卫星预计 2022 年发射,2023 年起可获得全球 DSM 和 DTM,并且对其保持季度和年度更新。

6.2 地形测深高程模型

在未来几十年,海岸线将对普遍预测的海平

面上升、风暴潮和灾难性事件等导致的沿海洪水泛滥做出响应。沿海环境物理过程受控于地上地形地貌与水下测深地貌,许多地理空间数据应用需要详细的近岸地形和水深测绘信息^[96]。

USGS 在 2013—2023 年核心科学系统策略报告中,将关键带(critical zone)的描述、理解与测图作为未来十年 3 大目标之一。通过获取更高精度和空间分辨率的三维陆地高程与海岸带水下地形数据,来更好地描述和理解人类活动影响与自然地表过程的关系^[97]。

自 2003 年以来,USGS 非常重视利用 LiDAR(机载、地面等平台)技术获取高分辨率、高精度的海岸带地形地貌信息,用于海平面上升相关的海岸带脆弱性分析与建模研究^[30, 89, 98]。USGS 通过开展海岸带国家高程数据库项目(Coastal National Elevation Database, CoNED),过去十年致力于开发全国无缝衔接的地形测深与高程模型(Topobathymetric Elevation Models, TBDEMs),定期发布其境内海岸带陆地、部分内陆湖泊、河流区域的潜在淹没风险制图^[99-103]。

6.3 高分辨率 DEM 发展趋势

1) 观测技术与观测平台趋于多样化。机载 InSAR、LiDAR 等技术在工程建设领域逐渐取代传统野外测图方式,UAV、无人船、无人车、无人潜航器等观测平台的使用越来越普遍,基于多源遥感影像数据(如 LiDAR、SAR、光学遥感等)融合已成为全球无缝、多尺度 DEM 生成的重要方法,SfM 技术使得网络相片等免费资源利用成为可能,人工智能与机器学习方法正在加速这种趋势^[42],将极大地降低 DEMs 的更新换代成本。

2) 高精度、高分辨率 DEM 更新换代周期逐渐缩短。得益于观测技术与观测平台的发展,全球尺度 DEM 与局部 DEM 的精度与空间分辨率差距逐渐缩小。基于地物变化探测应用驱动的高分辨率 DEM 数据的更新换代周期逐渐缩短^[104],从以年为周期逐渐发展到天为周期。

3) 高精度、高分辨率、空间基准一致的全球无缝地形数据获取逐渐成为可能。国内外正在加快构建基于潮汐模型与海洋基准面模型的海洋垂直基准转换关系,实现沿海海域陆地与海洋高程与深度基准的转换与统一^[16, 105-106]。

7 结 语

自然界地球物理与地质过程导致了地球表面地形起伏变化,而地形变化是研究地球科学、社会

经济等的关键影响因子。本文以观测平台为例,详细阐述了DEM数据获取方法、全球DEM数据性质和特征、质量评估方法与精度指标,介绍了高精度DEM数据在地质灾害监测与海岸带全球变化响应方面的应用。通过分析USGS与DLR正在开展的DEM数据项目,讨论了DEM数据的最新需求与发展趋势。观测技术与观测平台的发展加快了高精度、高分辨率、全球同质、海陆无缝衔接DEM数据的构建,对国家海洋安全、科学研究、工程建设等具有重要的意义。

致谢:感谢DLR TerraSAR-X(No. IDEM_CALVAL0059)与TanDEM-X(No. DEM_CALVAL1423)项目对本文前期研究的支持。

参 考 文 献

- [1] Miller C L, Laflamme R A. The Digital Terrain Model—Theory and Applications [J]. *Photogrammetric Engineering*, 1958, 24(3): 433-442
- [2] Li Zhilin, Zhu Qing, Xie Xiao. Digital Elevation Model [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2017 (李志林, 朱庆, 谢潇. 数字高程模型[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2017)
- [3] Tang Guo'an, Li Fayuan, Liu Xuejun. Digital Elevation Model Tutorial [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016(汤国安, 李发源, 刘学军. 数字高程模型教程[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2016)
- [4] Li Deren, Ding Lin, Shao Zhenfeng. Reflections on Issues in National Geographical Conditions Monitoring [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(2): 143-147(李德仁, 丁霖, 邵振峰. 关于地理国情监测若干问题的思考[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(2): 143-147)
- [5] Li Deren, Wang Yanjun, Shao Zhenfeng. Geo-Informatization of New Geographic Information Era [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(1): 1-6(李德仁, 王艳军, 邵振峰. 新地理信息时代的信息化测绘[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(1): 1-6)
- [6] Li Deren, Miao Qianjun, Shao Zhenfeng. Orientation and Framework of Geo-Informatization System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(3): 189-192(李德仁, 苗前军, 邵振峰. 信息化测绘体系的定位与框架[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(3): 189-192)
- [7] Li Deren, Gong Jianya, Zhu Xinyan, et al. Design and Implementaion of Digital Geospatial Data Framework in China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 1998, 23(4): 297-303(李德仁, 龚健雅, 朱欣焰, 等. 我国地球空间数据框架的设计思想与技术路线[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 1998, 23(4): 297-303)
- [8] Li Deren, Yao Yuan, Shao Zhenfeng. Dynamic 3D Modeling of Island, Reef and Surrounding Complex Environment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(11): 1 261-1 265(李德仁, 姚远, 邵振峰. 海岛礁及周边复杂环境动态三维建模[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(11): 1 261-1 265)
- [9] Li Deren, Shen Xin, Gong Jianya, et al. On Construction of China's Space Information Network [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(6): 711-715, 766 (李德仁, 沈欣, 龚健雅, 等. 论我国空间信息网络的构建[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(6): 711-715, 766)
- [10] Liu Lin, Li Deren, Li Wanwu, et al. Thoughts on Smarter Planet from the View of Geomatics [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(10): 1 248-1 251(柳林, 李德仁, 李万武, 等. 从地球空间信息学的角度对智慧地球的若干思考[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(10): 1 248-1 251)
- [11] Chevalier M L, Pan J, Li H, et al. First Tectonic-Geomorphology Study Along the Longmu-Gozha Co Fault System, Western Tibet [J]. *Gondwana Research*, 2017, 41: 411-424
- [12] Fang Lina, Yang Bisheng. Automated Extracting 3D Roads from Mobile Laser Scanning Point Clouds [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(2): 260-267(方莉娜, 杨必胜. 车载激光扫描的三维道路自动提取方法[J]. 测绘学报, 2013, 42(2): 260-267)
- [13] Yu Xiaohong. Errors Analysis of Map Scanning Digitizing [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2001, 26(4): 49-52(余晓红. 地图扫描数字化的误差分析[J]. 测绘科学, 2001, 26(4): 49-52)
- [14] Hao Xiangyang, Qian Zengbo. The Accuracy Analysis of Map Digitizing Based on Scanned Images [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1996, 25(1): 46-52(郝向阳, 钱曾波. 地图扫描数字化的点位精度分析[J]. 测绘学报, 1996, 25(1): 46-52)

- [15] Becker J J, Sandwell D T, Smith W H F, et al. Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution; SRTM30_PLUS [J]. *Marine Geodesy*, 2009, 32(4): 355-371
- [16] Zhai Guojun, Huang Motao. The Review of Development of Marine Surveying Technology [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1 752-1 759(翟国君, 黄漠涛. 海洋测量技术研究进展与展望 [J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1 752-1 759)
- [17] Zhao Jianhu, Ouyang Yongzhong, Wang Aixue. Status and Development Tendency for Seafloor Terrain Measurement Technology [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1 786-1 794(赵建虎, 欧阳永忠, 王爱学. 海底地形测量技术现状及发展趋势 [J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1 786-1 794)
- [18] Gutierrez F J, Gutowski M, Ganther S, et al. Deep Rippled Bedforms in Loch Ness; Evidence from An AUV Bathymetry Survey[J]. *IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*, 2014, doi:10.1109/AUV.2014.7054406
- [19] Hiller T, Steingrimsson A, Melvin R, Expanding the Small AUV Mission Envelope; Longer, Deeper and More Accurate [J]. *IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*, 2012;1-4
- [20] Zhang Jianqing, Pan Li, Wang Shugen. Photogrammetry [M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2009(张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学[M]. 2 版. 武汉:武汉大学出版社, 2009)
- [21] Li Deren, Wang Mi, Pan Jun, et al. Concept, Principle and Implementation of Seamless Stereo Orthimage Database [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(11): 950-954(李德仁, 王密, 潘俊, 等. 无缝立体正射影像数据库的概念、原理及其实现 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2007, 32(11): 950-954)
- [22] Baltsavias E P, Favey E, Bauder A, et al. Digital Surface Modelling by Airborne Laser Scanning and Digital Photogrammetry for Glacier Monitoring [J]. *The Photogrammetric Record*, 2001, 17(98): 243-273
- [23] Ning Jinsheng, Liu Jingnan, Li Deren, et al. Introduction to Surveying and Mapping [M]. 3rd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2016(宁津生, 刘经南, 李德仁, 等. 测绘学概论 [M]. 3 版. 武汉:武汉大学出版社, 2016)
- [24] Baltsavias E P. Airborne Laser Scanning; Basic Relations and Formulas [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54(2): 199-214
- [25] Wehr A, Lohr U. Airborne Laser Scanning—An Introduction and Overview [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54(2): 68-82
- [26] Buffington K J, Dugger B D, Thorne K M, et al. Statistical Correction of LiDAR-Derived Digital Elevation Models with Multispectral Airborne Imagery in Tidal Marshes [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 616-625
- [27] Brideau M A, Sturzenegger M, Stead D, et al. Stability Analysis of the 2007 Chehalis Lake Landslide Based on Long-Range Terrestrial Photogrammetry and Airborne LiDAR Data [J]. *Landslides*, 2012, 9(1): 75-91
- [28] Han Nana, Shan Xinjian, Song Xiaogang. VHR DEM Measurement Technology and Its Application in Active Fault Research [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2017, 39(3): 436-450(韩娜娜, 单新建, 宋小刚. 高空间分辨率数字高程模型测量技术及其在活断层研究中的应用 [J]. *地震学报*, 2017, 39(3): 436-450)
- [29] van Westen C J, Castellanos E, Kuriakose S L. Spatial Data for Landslide Susceptibility, Hazard, and Vulnerability Assessment; An Overview [J]. *Engineering Geology*, 2008, 102(3-4): 112-131
- [30] Gesch D B. Analysis of LiDAR Elevation Data for Improved Identification and Delineation of Lands Vulnerable to Sea-Level Rise [J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 25(6): 49-58
- [31] Liu Yanxiong, Guo Kai, He Xiufeng, et al. Research Progress of Airborne Laser Bathymetry Technology [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(9): 1 185-1 194(刘焱雄, 郭楷, 何秀凤, 等. 机载激光测深技术及其研究进展 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2017, 42(9): 1 185-1 194)
- [32] Yang Fanlin, Bao Jingyang, Hu Xingshu. Underwater Bathymetric Surveying [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2017(阳凡林, 暴景阳, 胡兴树. 水下地形测量 [M]. 武汉:武汉大学出版社, 2017)
- [33] Lou Liangsheng, Liu Siwei, Zhou Yu. Accuracy Analysis of Airborne InSAR System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(1): 63-67(楼良盛, 刘思伟, 周瑜. 机载 InSAR 系统精度分析 [J]. *武汉大学学报·信息科*

- 学版, 2012, 37(1): 63-67
- [34] Huang Guoman, Zhang Jixian, Zhao Zheng, et al. Research on Airborne SAR Interferometry Mapping System [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(3): 277-279(黄国满, 张继贤, 赵争, 等. 机载干涉 SAR 测绘制图应用系统研究 [J]. 测绘学报, 2008, 37(3): 277-279)
- [35] Wimmer C, Siegmund R, Schwabisch M, et al. Generation of High Precision DEMs of the Wadden Sea with Airborne Interferometric SAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2 234-2 245
- [36] Madsen S N, Zebker H A, Martin J. Topographic Mapping Using Radar Interferometry: Processing Techniques [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(1): 246-256
- [37] Zebker H A, Madsen S N, Martin J, et al. The TOPSAR Interferometric Radar Topographic Mapping Instrument [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 933-940
- [38] Diaz-Varela R A, Zarco-Tejada P J, Angileri V, et al. Automatic Identification of Agricultural Terraces Through Object-Oriented Analysis of very High Resolution DSMs and Multispectral Imagery Obtained from an Unmanned Aerial Vehicle [J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 134: 117-126
- [39] Colomina I, Molina P. Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 92: 79-97
- [40] Fonstad M A, Dietrich J T, Courville B C, et al. Topographic Structure from Motion: A New Development in Photogrammetric Measurement [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 38(4): 421-430
- [41] Johnson K, Nissen E, Saripalli S, et al. Rapid Mapping of Ultrafine Fault Zone Topography with Structure from Motion [J]. *Geosphere*, 2014, 10(5): 969-986
- [42] Li Deren, Wang Mi, Shen Xin, et al. From Earth Observation Satellite to Earth Observation Brain [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(2): 143-149(李德仁, 王密, 沈欣, 等. 从对地观测卫星到对地观测脑 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(2): 143-149)
- [43] Li Deren. Development Prospect of Photogrammetry and Remote Sensing [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(12): 1 211-1 215(李德仁. 摄影测量与遥感学的发展展望 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(12): 1 211-1 215)
- [44] Tang Xinming, Wang Hongyan, Zhu Xiaoyong. Technology and Applications of Surveying and Mapping for ZY-3 Satellites [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1 482-1 491(唐新明, 王鸿燕, 祝小勇. 资源三号卫星测绘技术与应用 [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1 482-1 491)
- [45] Toutin T. ASTER DEMs for Geomatic and Geoscientific Applications: A Review [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(7): 1 855-1 875
- [46] Wang Mi, Yang Bo, Li Deren, et al. Technologies and Applications of Block Adjustment Without Control for ZY-3 Images Covering China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(4): 427-433(王密, 杨博, 李德仁, 等. 资源三号全国无控制整体区域网平差关键技术及应用 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(4): 427-433)
- [47] Tang Xinming, Li Guoyuan. Development and Prospect of Laser Altimetry Satellite [J]. *Space International*, 2017(467): 13-18(唐新明, 李国元. 激光测高卫星的发展与展望 [J]. 国际太空, 2017(467): 13-18)
- [48] Zwally H J, Schutz B, Abdalati W, et al. ICESat's Laser Measurements of Polar Ice, Atmosphere, Ocean, and Land [J]. *Journal of Geodynamics*, 2002, 34(3-4): 405-445
- [49] Dong Yusen, Hsing-Chung C, Zhang Kui, et al. CryoSat-2 SARIn Interferometric Processing for DEM Generation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(6): 803-809(董玉森, Hsing-Chung C, 张奎, 等. CryoSat-2 SARIn 数据干涉处理及 DEM 获取 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(6): 803-809)
- [50] Xiao Feng, Li Fei, Zhang Shengkai, et al. DEM Production for Larsemann Hills Combining CryoSat-2 and Ground-Based Elevation Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(10): 1 417-1 422(肖峰, 李斐, 张胜凯, 等. 联合 CryoSat-2 测高数据和地面高程数据建立东南极拉斯曼丘陵地区 DEM [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(10): 1 417-1 422)
- [51] Zhang Shengkai, Xiao Feng, Li Fei, et al. DEM

- Development and Precision Analysis in Two Local Areas of Antarctica, Using CryoSat-2 Altimetry Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(11): 1 434-1 439(张胜凯, 肖峰, 李斐, 等. 基于 CryoSat-2 测高数据的南极局部地区 DEM 的建立与精度评定 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(11): 1 434-1 439)
- [52] Li Qianqian, Bao Lifeng. Comparative Analysis of Methods for Bathymetry Prediction from Altimeter-derived Gravity Anomalies [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2016, 36(5): 1-4(李倩倩, 鲍李峰. 测高重力场反演海底地形方法比较 [J]. 海洋测绘, 2016, 36(5): 1-4)
- [53] Nie Linjuan, Wu Yunsun, Jin Taoyong, et al. Inversion of Submarine Topography of South China Sea by Using Gravity Anomaly Caused by Mass Deficiency [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(1): 43-46(聂琳娟, 吴云孙, 金涛勇, 等. 基于海水质量亏损引起的重力异常反演南海海底地形 [J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(1): 43-46)
- [54] Hu Minzhang, Li Jiancheng, Jin Taoyong, et al. Recovery of Bathymetry over China Sea and Its Adjacent Areas by Combination of Multi-source Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(9): 1 266-1 273(胡敏章, 李建成, 金涛勇, 等. 联合多源数据确定中国海及周边海底地形模型 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(9): 1 266-1 273)
- [55] Zheng Quanan, Xie Lingling. Progress in Research of Satellite SAR Detection of Ocean Bottom Topography [J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(2): 147-161(郑全安, 谢玲玲. 卫星合成孔径雷达探测海底地形研究进展 [J]. 海洋科学进展, 2016, 34(2): 147-161)
- [56] Gesch D B, Verdin K L, Greenlee S K. New Land Surface Digital Elevation Model Covers the Earth [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1999, 80(6): 69-70
- [57] Danielson J, Gesch D. Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010) [OL]. <https://doi.org/10.3133/ofr20111073>, 2011
- [58] Farr T G, Rosen P A, Caro E, et al. The Shuttle Radar Topography Mission [J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2): 361
- [59] Hirt C, Claessens S, Fecher T, et al. New Ultra-High-Resolution Picture of Earth's Gravity Field [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(16): 4 279-4 283
- [60] Jarvis A, Reuter H, Nelson A, et al. Hole-Filled SRTM for the Globe Version 4 [OL]. <http://srtm.csi.cgiar.org>, 2008
- [61] NASA. SRTM Topography Update: Includes NASA Version 3.0 (SRTM Plus) [OL]. https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/measures/docs/NASA_SRTM_V3.pdf, 2018
- [62] DLR. DLR SRTM X-SAR Digital Elevation Models [OL]. https://centaurus.caf.dlr.de/8443/eowebng/licenseAgreements/DLR_SRTM_Readme.pdf, 2018
- [63] Slater J A, Heady B, Kroenung G, et al. Global Assessment of the New ASTER Global Digital Elevation Model [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2011, 77(4): 335-349
- [64] Abrams M, Bailey B, Tsu H, et al. The ASTER Global DEM [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2010, 76(4): 344-348
- [65] Tachikawa T, Kaku M, Iwasaki A, et al. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2—Summary of Validation Results [OL]. https://lpdaacaster.cr.usgs.gov/GDEM/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf, 2018
- [66] Takaku J, Tadono T. Quality Updates of AW3D Global DSM Generated from ALOS PRISM[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Fort Worth, Texas, USA, 2017
- [67] Wu Yanlan, Hu Hai, Hu Peng, et al. A Review on the Issues in DEM Error and DEM Quality Assessment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(5): 568-574(吴艳兰, 胡海, 胡鹏, 等. 数字高程模型误差及其评价的问题综述 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(5): 568-574)
- [68] Hu Hai, Wu Yanlan, Hu Peng. Discussion of DEM Standards, Quality Theory and Conceptions [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(6): 713-716(胡海, 吴艳兰, 胡鹏. 数字高程模型精度标准、质量理论和科学观念讨论 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(6): 713-716)
- [69] Chen Chuanfa, Yan Changqing, Liu Fengying, et al. A Total Error-Based Interpolation Method for DEM Generation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(5): 739-744(陈传法, 闫长青, 刘凤英, 等. 一种综合考虑

- 采样点水平和高程误差的 DEM 建模算法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(5): 739-744
- [70] Chen Chuanfa, Liu Fengying, Yan Changqing, et al. A Huber-Derived Robust Multi-quadric Interpolation Method for DEM Construction [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(6): 803-809(陈传法, 刘凤英, 闫长青, 等. DEM 建模的多面函数 Huber 抗差算法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(6): 803-809)
- [71] Xu Zhimin, Lin Zhiyong, Li Wenjing, et al. DEM Accuracy Evaluation Model Based on Cut Fill Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(8): 1 167-1 171(徐志敏, 林志勇, 李雯静, 等. 基于填挖方分析的 DEM 精度评价模型 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(8): 1 167-1 171)
- [72] Li P, Li Z, Muller J P, et al. A New Quality Validation of Global Digital Elevation Models Freely Available in China [J]. *Survey Review*, 2016, 48(351): 409-420
- [73] Li P, Shi C, Li Z, et al. Evaluation of ASTER GDEM Using GPS Benchmarks and SRTM in China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(5): 1 744-1 771
- [74] Li P, Shi C, Li Z H, et al. Evaluation of ASTER GDEM ver2 Using GPS Measurements and SRTM ver4. 1 in China [J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, I-4: 181-186
- [75] Li Peng, Li Zhenhong, Shi Chuang, et al. Quality Evaluation of 1 Arc Second Version SRTM DEM in China [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(9): 24-28(李鹏, 李振洪, 施闯, 等. 中国地区 30 米分辨率 SRTM 质量评估 [J]. 测绘通报, 2016(9): 24-28)
- [76] Hirt C, Filmer M, Featherstone W. Comparison and Validation of the Recent Freely Available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4. 1 and GEODATA DEM-9S ver3 Digital Elevation Models over Australia [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2010, 57(3): 337-347
- [77] Jarvis A, Rubiano J, Nelson A, et al. Practical Use of SRTM Data in the Tropics: Comparisons with Digital Elevation Models Generated from Cartographic Data [J]. *Working Document*, 2004, 198: 32
- [78] Carabajal C C, Harding D J, Boy J P, et al. Evaluation of the Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010) Using ICESat Geodetic Control[C]. International Symposium on Lidar and Radar Mapping 2011: Technologies and Applications, Nanjing, China, 2011
- [79] Höhle J, Höhle 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
- [80] 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
- [81] Zink M, Bachmann M, Brautigam B, et al. TanDEM-X: The New Global DEM Takes Shape [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2014, 2(2): 8-23
- [82] Tomás R, Li Z. Earth Observations for Geohazards: Present and Future Challenges [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 194
- [83] Scaioni M. Remote Sensing for Landslide Investigations: From Research into Practice [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(11): 5 488
- [84] Scaioni M, Longoni L, Melillo V, et al. Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(10): 9 600
- [85] Pachauri R K, Allen M R, Barros V R, et al. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014
- [86] Hinkel J, Jaeger C, Nicholls R J, et al. Sea-Level Rise Scenarios and Coastal Risk Management [J]. *Nature Clim Change*, 2015, 5(3): 188-190
- [87] Cazenave A, Cozannet G L. Sea Level Rise and Its Coastal Impacts [J]. *Earth's Future*, 2014, 2(2): 15-34
- [88] Fitz Gerald D M, Fenster M S, Argow B A, et al. Coastal Impacts due to Sea-Level Rise Morphodynamics of Holocene Salt Marshes: A Review Sketch from the Atlantic and Southern North Sea Coasts of Europe [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2008, 36(1): 601-647
- [89] Gesch D B. Consideration of Vertical Uncertainty in Elevation-Based Sea-Level Rise Assessments: Mo-

- bile Bay, Alabama Case Study [J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 63: 197-210
- [90] You Zaijin. Coastal Inundation and Erosion Hazards Along the Coast of China and Mitigation Strategies [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 31(10): 1 190-1 196(尤再进. 中国海岸带淹没和侵蚀重大灾害及减灾策略 [J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1 190-1 196)
- [91] Kang Lei, Ma Li, Liu Yi. Loss Evaluation of Farmland Caused by Sea Level Rise and Storm Surge in the Pearl River Delta Region Under Global Climate Change [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1 375-1 389(康蕾, 马丽, 刘毅. 珠江三角洲地区未来海平面上升及风暴潮增水的耕地损失预测 [J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1 375-1 389)
- [92] Ciro Aucelli P P, Di Paola G, Incontri P, et al. Coastal Inundation Risk Assessment due to Subsidence and Sea Level Rise in a Mediterranean Alluvial Plain (Volturno Coastal Plain-Southern Italy) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, 198: 597-609
- [93] Lentz E E, Thieler E R, Plant N G, et al. Evaluation of Dynamic Coastal Response to Sea-Level Rise Modifies Inundation Likelihood [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(7): 696-700
- [94] Gallant J C, Read A M, Dowling T I. Removal of Tree Offsets from SRTM and Other Digital Surface Models [J]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012(1): 275-280
- [95] Moreira A, Krieger G, Hajnsek I, et al. Tandem-L: A Highly Innovative Bistatic SAR Mission for Global Observation of Dynamic Processes on the Earth's Surface [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2015, 3(2): 8-23
- [96] Brock J C, Purkis S J. The Emerging Role of LiDAR Remote Sensing in Coastal Research and Resource Management [J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 25(6): 1-5
- [97] Bristol R S, Euliss Jr N H, Booth N L, et al. Science Strategy for Core Science Systems in the US Geological Survey, 2013—2023[OL]. <https://doi.org/10.3133/ofr2012093>, 2012
- [98] Li Deren, Sui Haigang, Shan Jie. Discussion on Key Technologies of Geographic National Conditions Monitoring [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(5): 505-512(李德仁, 眭海刚, 单杰. 论地理国情监测的技术支撑 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(5): 505-512)
- [99] Gesch D B, Brock J C, Parrish C E, et al. Introduction: Special Issue on Advances in Topobathymetric Mapping, Models, and Applications [J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 25(6): 1-3
- [100] Thatcher C A, Brock J C, Danielson J J, et al. Creating a Coastal National Elevation Database (CoNED) for Science and Conservation Applications [J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 76: 64-74
- [101] Danielson J J, Poppenga S K, Brock J C, et al. Topobathymetric Elevation Model Development Using a New Methodology: Coastal National Elevation Database [J]. *Journal of Coastal Research*, 2016: 75-89
- [102] Loftis J D, Wang H V, de Young R J, et al. Using LiDAR Elevation Data to Develop a Topobathymetric Digital Elevation Model for Sub-grid Inundation Modeling at Langley Research Center [J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 76: 134-148
- [103] Parrish C E, Dijkstra J A, O'Neil-Dunne J P M, et al. Post-Sandy Benthic Habitat Mapping Using New Topobathymetric LiDAR Technology and Object-Based Image Classification [J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 76: 200-208
- [104] Li Deren, Xia Song, Jiang Wanshou, et al. Approach for Terrain Change Detection and DEM Updating [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(7): 565-568(李德仁, 夏松, 江万寿, 等. 一种地形变化检测与 DEM 更新的方法研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(7): 565-568)
- [105] Zhou Xinghua, Fu Yanguang, Xu Jun. Progress and Prospects in Developing Marine Vertical Datum [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1 770-1 777(周兴华, 付延光, 许军. 海洋垂直基准研究进展与展望 [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1 770-1 777)
- [106] Bao Jingyang, Xu Jun, Yu Caixia. Technical Progress and Development Directions of Oceanic Spatial Information Datum [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1 778-1 785(暴景阳, 许军, 于彩霞. 海洋空间信息基准技术进展与发展方向 [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1 778-1 785)

Research Progress of Global High Resolution Digital Elevation Models

LI Zhenhong^{1,2} LI Peng^{2,3} DING Dong^{2,3} WANG Houjie^{2,3}

1 School of Engineering, Newcastle University, Newcastle Upon Tyne NE1 7RU, United Kingdom

2 Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Technology, Institute of Estuarine and Coastal Zone, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

3 Laboratory of Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China

Abstract: There are many geologic processes that shape the surface of the Earth, and the evolution of topography provides us clues to the interior of the Earth and the forces that exist there. Firstly, in this paper, the origin and definition of digital elevation models (DEMs) are briefly introduced followed by their common acquisition methods according to ground-based, shipborne, airborne and spaceborne observation platforms. Secondly, the main characteristics of existing global high resolution DEMs are demonstrated with emphasis on nine commonly-used global DEMs. Thirdly, a common procedure for DEM quality evaluation is presented. Fourthly, the potential applications of DEMs to geological disaster monitoring and coastal vulnerability analysis are described. Taking the ongoing DEM projects in USGS (United States Geological Survey) and DLR (Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt) as examples, the requirements for high precision high resolution globally consistent and homogeneous DEMs and topobathymetric elevation models are discussed. Finally, the future trends and prospects of global high resolution DEMs are summarized. We find that fusion of multi-source remote sensing image data (such as LiDAR, SAR and optical remote sensing) has become an important approach to generate global multi-scale seamless DEMs, and the use of unmanned aircrafts and ships as observation platforms makes it possible to shorten the renewal cycle of high precision high resolution DEMs.

Key words: digital elevation model; SAR interferometry; optical stereo; geological hazards; quality evaluation

First author: LI Zhenhong, PhD, professor, main interests include imaging Geodesy and its applications to geohazards, precision agriculture and infrastructure stability. E-mail: Zhenhong.Li@newcastle.ac.uk

Corresponding author: LI Peng, PhD. E-mail: pengli@ouc.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41806108, 41606066; the National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFA0600903; Shandong Provincial Natural Science Foundation, No. ZR2016DB30; China Postdoctoral Science Foundation, No. 2016M592248; Qingdao Indigenous Innovation Program, No. 16-5-1-25-jch; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 201713039; Qingdao Postdoctoral Application Research Project; Natural Environment Research Council, Nos. COMET; come30001, LICS: NE/K010794/1, CEDRRIC: NE/N012151/1; Green Card Talent Program of Ocean University of China.