

doi:10.3799/dqkx.2013.087

基于 ICESat/GLAS 数据的中国典型区域 SRTM 与 ASTER GDEM 高程精度评价

杜小平^{1,2}, 郭华东¹, 范湘涛¹, 朱俊杰¹, 严珍珍¹, 詹勤¹

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 中国科学院数字地球重点实验室, 北京 100094

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 航天飞机雷达地形测绘(shuttle radar topography mission, SRTM)和先进星载热发射和反射辐射成像仪全球数字高程模型(advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer global digital elevation model, ASTER GDEM)提供了全球覆盖面积最广的数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据,但其高程精度还未得到充分验证,传统地面测量方法很难适用于验证大面积范围的 DEM 精度。以冰、云和陆地高程卫星/地学激光测高系统(ICESat/GLAS)高程数据为参考,综合利用地理信息系统(geographic information system, GIS)空间分析、三维可视化与统计分析方法,对中国典型低海拔沿海平原地区和高海拔山地的两种 DEM 数据高程精度进行了对比分析。结果表明,高程值小于 20 m 的低海拔地区, SRTM 高程精度达到 2.39 m, ASTER GDEM 的精度达到 4.83 m,均远远高于这两种数据的标称精度;而在西南山地,这两种 DEM 的精度大约为 20 m,与标称精度相当。最后,建立了 ICESat/GLAS 与 SRTM 和 ASTER GDEM 的一元线性回归模型,该模型具有较高的拟合度和显著线性关系,可用于改善这两种 DEM 的高程精度。

关键词: 数字高程模型; 卫星地学激光测高; 遥感; 高程精度评估。

中图分类号: P237

文章编号: 1000-2383(2013)04-0887-11

收稿日期: 2012-10-09

Vertical Accuracy Assessment of SRTM and ASTER GDEM over Typical Regions of China Using ICESat/GLAS

DU Xiao-ping^{1,2}, GUO Hua-dong¹, FAN Xiang-tao¹, ZHU Jun-jie¹, YAN Zhen-zhen¹, ZHAN Qin¹

1. Key Laboratory of Digital Earth, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: SRTM (shuttle radar topography mission) and ASTER GDEM (advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer global digital elevation model), the most accurate and available global DEM (digital elevation model) data, cover nearly the entire land surface of the earth. However, the precision of these DEM data has not been fully validated. This paper focuses on Chinese typical regions, aiming to verify the elevation precision of SRTM and ASTER GDEM based on ICESat / GLAS (ice, cloud, and land elevation satellite/geoscience laser altimeter system) elevation data by utilization of GIS (geographic information system) spatial analysis, 3D visualization and statistical analysis methods. The results show that SRTM elevation precision reaches 2.39 m, and ASTER GDEM precision reaches 4.83 m in the low altitude areas where the elevation value is less than 20 m. The elevation precision is higher than the specified precision in both cases. However, the precision in Southwest study area is similar to the specified precision. The established linear regression model in the present study has high goodness of fit and significant correlation, but the applicability of the model needs further study.

Key words: digital elevation model (DEM); ICESat/GLAS; remote sensing; elevation accuracy assessment.

基金项目: 国家“973”计划项目(No. 2009CB723906); 中国科学院对地观测与数字地球科学中心主任科学基金(No. 09ZZ12101B); 国家自然科学基金(No. 41071274); 国家自然科学基金重点项目(No. 61132006).

作者简介: 杜小平(1978-), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为数字地球与全球变化遥感. E-mail: xpdu@ceode.ac.cn

数字高程模型(digital elevation model, DEM)是地学分析的基础数据,已广泛应用于全球变化、数字地球、自然灾害、环境保护等科学与工程领域(Ye *et al.*, 2008; 康川等,2010;王旭等,2012). SRTM 和 ASTER GDEM 数据是全球最完整的高精度地形数据,为全球和区域规模的地学分析提供了可靠的数据来源(陈俊勇 2005; Farr *et al.*, 2007). 全球 DEM 数据的精度评价至关重要,这些数据是模型的重要参数,DEM 数据的精度决定了研究结果的精度.

SRTM 和 ASTER GDEM 全球公开以来,对这两种数据的精度评价一直是研究的热点,目前主要包括利用 DEM 对 DEM、野外测量方式获取地面控制点、机载雷达以及星载激光雷达数据等验证方式. DEM 对 DEM 验证方式只能获得相对 DEM 精度(Koch and Lohmann, 2000; Toutin, 2002; Nikolakopoulos *et al.*, 2006). 基于 GPS 测量数据验证 DEM 精度是最常用的方式(Sun *et al.*, 2003; Gorokhovich and Voustianiouk 2006; Hirt *et al.*, 2010),可以获得较高精度的地面控制点,但野外测量工作量大,很难获取大面积、大量的测量点. 机载激光雷达可以获取高精度的参考点(Hvidegaard *et al.*, 2011),但数据获取成本大,限制了其大规模应用. 自 2003 年开始获取星载激光雷达数据 ICESat/GLAS 以来,大量研究对其精度进行了评价(Abshire *et al.*, 2005; Schutz *et al.*, 2005),证明了 GLAS 数据的高精度优势,利用 ICESat/GLAS 数据评估 DEM 精度成为可能(Carabajal and Harding, 2005; Bhang *et al.*, 2007).

全球范围的 DEM 数据精度评价已有不少研究结果(Rodriguez *et al.*, 2006),但全球范围尺度的

研究结论很难适用于所有区域,同时,对同一地区 SRTM 和 ASTER GDEM 的对比研究相对缺乏. 中国幅员辽阔,仅仅靠地面采样点的 GPS 实测数据,很难验证大范围的 DEM 精度,因此利用高精度星载激光雷达测高数据,对中国区域大面积的 DEM 高程数据进行精度评价,具有重要意义. SRTM 和 ASTER GDEM 这两种 DEM 数据,分别利用 InSAR 和立体像对的方法获取,受高程数据获取方法的限制,地势起伏不平的高原和丘陵地区对高程精度影响较大,本文假设地势起伏较小的沿海低海拔地区 DEM 高程精度高于西南高海拔山地,采用综合分析的方法验证这种假设. ICESat/GLAS 是第一颗卫星激光雷达测量仪器提供的测高数据,具有 ±14 cm 的垂直精度,为 DEM 高程精度评价提供了参考. 本文借助星载激光雷达 ICESat/GLAS 的 GLA14 高程数据产品,综合利用 GIS 空间分析、三维可视化与统计分析方法,评价 DEM 数据精度,对比研究典型区域 SRTM 和 ASTER GDEM 的高程精度;研究 SRTM 和 ASTER GDEM 的精度分布和地形特征的关系;建立 ICESat/GLAS 高程数据与 DEM 数据之间的回归模型,以改善一定范围内 SRTM 和 ASTER GDEM 高程精度.

1 研究区域

本文分别选择中国典型高海拔山地和低海拔沿海平原为研究区. 选取中国西南的云南中北部及四川南部地区为典型山地研究区,如图 1a 所示,地理范围为 27°~24°N, 110°~103°E;选取中国东部的环

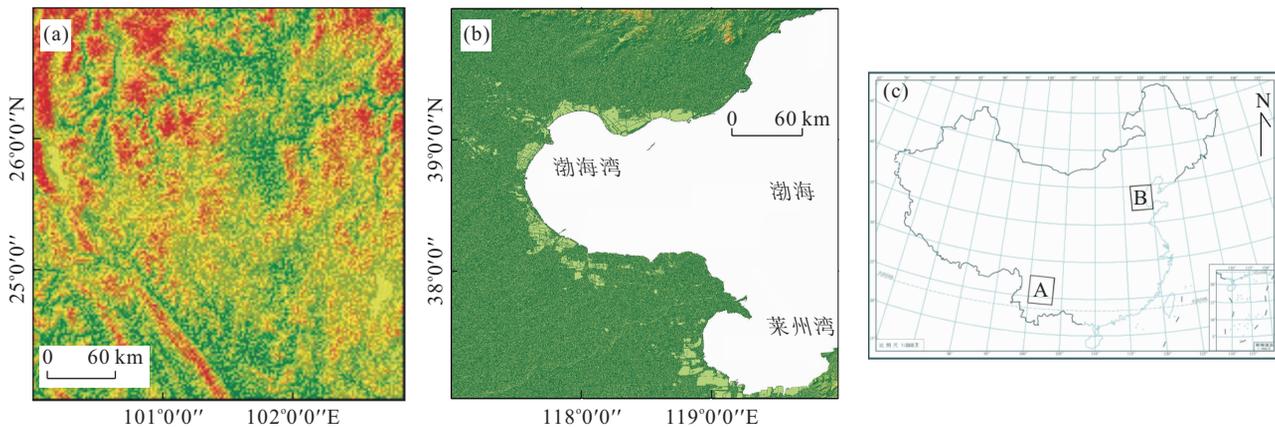


图 1 研究区域选择

Fig. 1 Study areas

a. 西南研究区渲染地形; b. 环渤海研究区渲染地形; c. 研究区域所在的位置; A 为西南研究区; B 为渤海研究区

渤海区域为典型低海拔平原研究区,如图 1b 所示,地理范围为 $40^{\circ} \sim 37^{\circ}\text{N}$, $117^{\circ} \sim 120^{\circ}\text{E}$;两个研究区域南北跨度大约 330 km,东西跨度大约 330 km,在地形图中的位置如图 1c 所示.西南研究区域 DEM 平均高度为 2 000 m 左右,该地区地面起伏较大,山脉较多,是复杂地形区域典型代表.渤海研究区域是中国备受关注的大河三角洲地区之一,该地区的人口众多,经济发达,但是由于平均海拔低,是受海平面上升影响最脆弱的地区,DEM 平均高度在 10 m 左右,是低海拔平原地区的典型代表.

2 数据来源

SRTM(shuttle radar topography mission,航天飞机雷达地形测绘任务)是美国航天局(NASA)、美国国防部国家地理空间情报局(NGA)、德国与意大利空间局合作,由奋进号航天飞机于 2000 年 2 月 11 日—2000 年 2 月 22 日共 11 d 飞行完成的测量任务. SRTM 搭载两种合成孔径雷达传感器,即 X 波段(3.1 cm)和 C 波段(5.66 cm)传感器,共获取北纬 60° ~南纬 56° 之间的雷达影像,覆盖全球陆地面积 80% 以上地区(Rabus *et al.*, 2003). SRTM 选择在冬天飞行,可以最小化植被和森林的植被冠层影响,然而树冠和树枝对后向散射系数的影响不可忽略,因此 SRTM 实际获取的是数字地表高程模型(DSM). SRTM 共有 $3''$ (SRTM3,相当于 90 m)和 $1''$ (SRTM1,相当于 30 m)两种水平分辨率产品,目前全球范围内可以获取的数据是 SRTM3 产品,发布的数据已经过正射处理,以 WGS84 为参考椭球体,以 EGM96 模型为水准面,绝对高程精度为 ± 16 m(Farr *et al.*, 2007). 本文数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://datamirror.csdb.cn>),数据修订版本为 V4.1,由国际热带农业中心(CIAT)的研究人员利用插值算法填补了 SRTM 数据空洞.

ASTER(先进星载热发射和反射辐射成像仪)由日本研制,搭载于 NASA 的 TERRA 对地观测卫星平台上,由可见光近红外、短波红外与热红外传感器组成,用于全球制图和温度测量(Toutin, 2008). 2009 年 6 月 30 日, NASA 与日本经济产业省(METI)联合发布了 ASTER GDEM(ASTER 全球 DEM),以 ASTER 获取的 150 万景存档影像为基础,采用立体相对处理等步骤完成. ASTER GDEM 数据覆盖范围为北纬 83° ~南纬 83° 之间的所有陆

地区域,是目前覆盖最广的全球 DEM. ASTER GDEM 以 WGS84/EGM96 为参考,水平方向分辨率是 $1''$ (30 m),垂直方向精度是 ± 20 m(Reuter *et al.*, 2009; ASTER GDEM Validation Team, 2009). 本研究使用的 ASTER GDEM 是 2011 年 11 月发布的 V2.0 版本数据,研究发现,和 V1.0 相比最新版本的数据在精度上有较大改进(<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>).

2003 年 1 月,ICESat(ice, cloud and land elevation satellite,冰、云和陆地高程卫星)由 NASA 发射,该卫星上的 GLAS(地学激光测高系统)用来测量冰盖高及其随时间的变化、云层和气溶胶的外形、陆地高和植被的厚度以及海冰的厚度等(Abshire *et al.*, 2005). GLAS 激光器发射波长为 532 nm 可见光和 1 064 nm 近红外激光脉冲,地面激光光斑直径大约 70 m,每个光斑在轨道方向的距离是 172 m,激光雷达测高垂直分辨率可达 14 cm(Schutz *et al.*, 2005). 由于测量精度高,ICESat/GLAS 数据已经广泛应用于地形获取(鄂栋臣等, 2009)、环境监测(Simard *et al.*, 2008)和植被参数反演(Sun *et al.*, 2008). 本研究数据来源于美国国家冰雪数据中心(<http://nsidc.org/data/ICESat/>).

3 研究方法

3.1 ICESat/GLAS 数据处理

本文从国际冰雪数据中心(NSIDC, national snow and ice data center)下载了研究区域内所有可以获取的 ICESat/GLAS 的 GLA14 陆地测高数据. 环渤海地区从 2003 年 2 月 26 日—2009 年 10 月 08 日共 19 期数据,共计 106 941 个点. 西南山地 2003 年

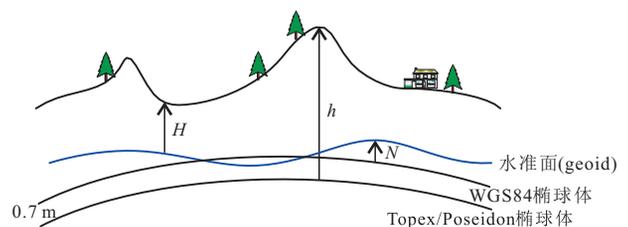


图 2 从 GLA14 产品提取的各参数之间的关系以及 WGS84 椭球体与 Topex/Poseidon 椭球体之间的关系

Fig. 2 Relation of elevation parameters extracted from GLA14 and the relation between WGS84 ellipsoid elevation and Topex/Poseidon ellipsoid elevation

2月22日—2009年10月10日共19期数据,共计170 588个点. NSIDC提供的高程提取工具(NGAT)从原始二进制文件中读取测高数据,该工具提取的数据主要包括4个参数,分别为*i_lat*, *i_lon*, *i_elev*和*i_gdHt*,高程单位为m. 参数*i_lat*和*i_lon*分别为所测点的大地经度、大地纬度;参数*i_elev*是相对于参考椭球体(Topex/Poseidon)的高度,即图2中的*h*值;参数*i_gdHt*为大地水准面差距(geoid high),是大地水准面和参考椭球面的距离,即图2中的*N*值,根据海平面的起伏,该值有正有负. 正高(orthometric height)的定义是从一地面点沿过此点的重力线到大地水准面的距离,即图2中*H*值(Bhang *et al.*, 2007). 因此,地面高程即正高可由公式(1)获得:

$$H_{\text{Topex/Poseidon}} = h - N. \quad (1)$$

同时, SRTM的高程是相对于WGS84椭球体的高度,因此,在比较这两种高程之前,需要把数据转换到同一个参考椭球体之下. NSIDC提供了转换工具(<http://nsidc.org/data/ICESat/tools.html>). 由于WGS84椭球体和Topex/Poseidon椭球体参数下的高程数据差异在70~71 cm之间,如图3所示,本文将从GLA14中提取的高程值 $H_{\text{Topex/Poseidon}}$ 值减70 cm得到WGS84椭球体下的高程值:

$$H_{\text{WGS84}} = h - N - 0.70. \quad (2)$$

从GLA14数据中提取的地面高程点叠加SRTM数据如图4所示,通过对高程数据分级专题

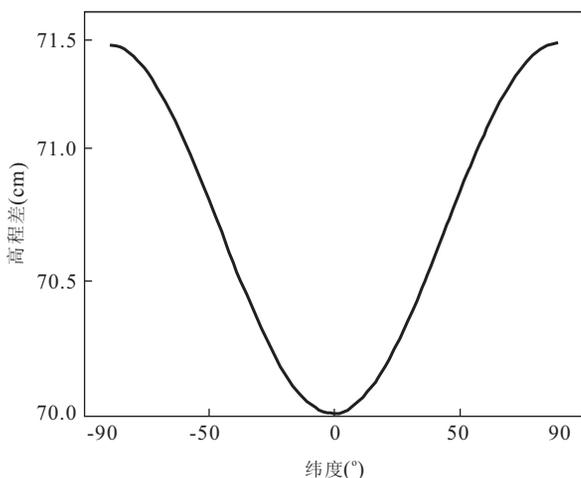


图3 以Topex/Poseidon椭球体为参考的高程与以WGS84椭球体为参考的高程之差在全球范围内的分布

Fig. 3 Elevation differences distribution between Topex/Poseidon and WGS84 (90°N to 90°S)

显示发现,即使在地势平坦的地区,ICESat/GLAS数据也有异常高值的情形,在三维视图下可以明显观测到高程值的异常起伏(图5),正常点和SRTM高程值套合比较紧密,而异常点位于地面之上,同一区域的高程值相差达1 000多m. 通过三维视图,可以直观分析ICESat/GLAS数据的粗差点分布状态. 存在高程异常值的部分原因是激光回波信号记录的是较厚云层顶部的高度,即由于云层遮挡引起高度值的误差(Carabajal and Harding 2006).

3.2 DEM精度分析方法

本文综合利用GIS空间分析、统计分析方法和三维可视化等方法对数据进行分析,发现数据的规律,建立提高DEM精度的数学模型. 获取的ICESat/GLAS数据为离散的矢量点(x, y, z)数据,DEM数据为栅格数据,为了能对两种数据进行比较分析,需要将两种数据统一为同一数据格式. 利用GIS中的空间分析工具,提取DEM高程值到点(extract values to points),即将DEM栅格数据中高程值提取到ICESat/GLAS矢量点数据中,作为矢量数据的属性字段,以进行后续比较与统计分析.

由于原始ICESat/GLAS数据存在粗差,因此分析之前需要过去粗差处理,即将GLA14与DEM的高程差值小于-100大于100的点作为粗差去掉. 分别针对SRTM和ASTER GDEM数据去除粗差之后,两种数据保留的ICESat/GLAS参考点数产生了差异,反映到表1和表2中的两种数据的样本点数不一致,但由于差异比较小,因此表1和表2中没有分别统计两种数据对应的ICESat/GLAS参考点,而是采用了与SRTM对比的参考点作为统计样本. 对于高程数据,本文分别统计其基本参数,包括样本点数、均值、标准差、中位数、最大值、最小值等,对比分析研究区域的ICESat/GLAS、SRTM和ASTER GDEM这3种数据的参数值,得出这3种高程值的差异. 为了进一步做对比分析,本文分别做ICESat/GLAS和SRTM的高程差、ICESat/GLAS和ASTER GDEM的高程差;对于高程差(d_i),分别统计以下主要参数:

$$\text{平均误差: } Mean = \frac{\sum d_i}{n}, \quad (3)$$

$$\text{标准差: } Std. Dev. = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \mu)^2}{n}},$$

$$\mu = Mean, \quad (4)$$

$$\text{均方根误差: } RMSE = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}}. \quad (5)$$

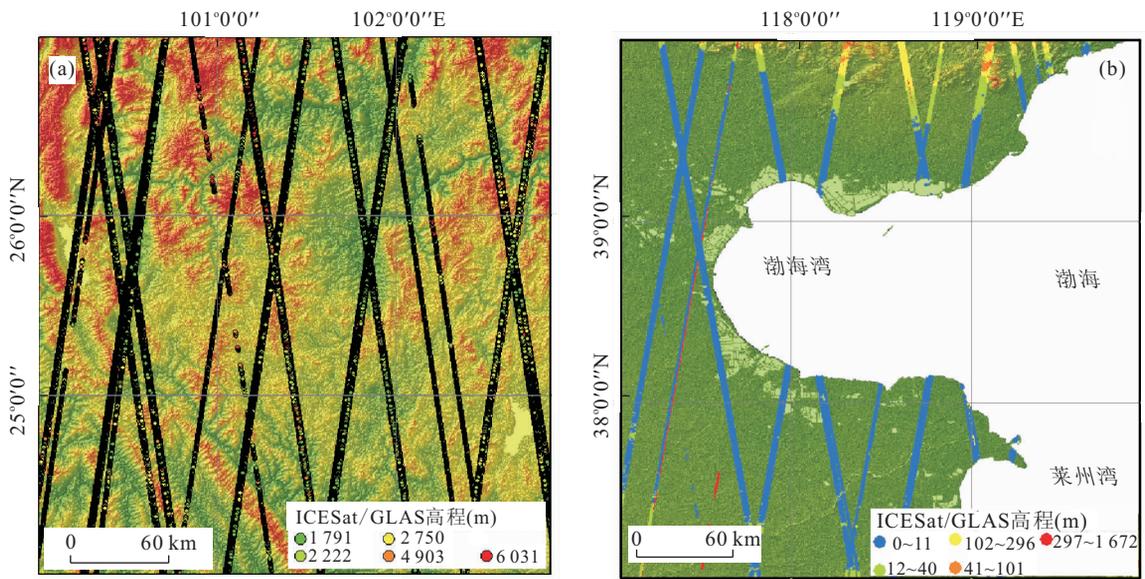


图4 ICESat/GLAS 数据叠加 SRTM DEM 数据
Fig. 4 ICESat/GLAS data overlaid SRTM DEM data
a. 为西南研究区; b. 为环渤海研究区; 其中橙色与红色为粗差点

表1 高程值描述统计分析

Table 1 Descriptive statistics of elevation

统计参数	环渤海区域			西南地区		
	ICESat/GLAS	SRTM	ASTER	ICESat/GLAS	SRTM	ASTER
样本点数	99 326	99 326	109 318	141 697	141 697	141 738
均值(m)	12.69	14.01	11.93	1 871.67	1 873.44	1 875.19
标准差(m)	23.81	23.37	19.61	427.67	427.26	429.22
中位数(m)	5.44	7.00	7.00	1 900.68	1 902.00	1 903.00
最大值(m)	438.89	423.00	412.00	3 540.12	3 500.00	3 548.00
最小值(m)	0.00	0.00	1.00	498.90	503.00	496.00

表2 二次剔除粗差后的基础描述统计分析

Table 2 Descriptive analysis of elevation after the second outlier removal

统计参数	环渤海区域			西南地区		
	ICESat/GLAS	SRTM	ASTER	ICESat/GLAS	SRTM	ASTER
样本点数	98 764	98 764	108 704	140 116	140 116	140 060
均值(m)	12.07	13.50	11.74	1 871.79	1 873.39	1 873.49
标准差(m)	21.76	21.39	19.07	427.17	426.77	428.62
最大值(m)	438.89	423.00	412.00	3 540.12	3 500.00	3 548.00
最小值(m)	0.00	1.00	1.00	498.90	503.00	496.00

平均误差是把 ICESat/GLAS 作为标准高程, 计算 ICESat/GLAS 与 SRTM 和 ASTER GDEM 高程差的平均值, 其物理意义就是 SRTM/ASTER GDEM 的系统误差. 标准差是衡量数据精度的一种指标, 对一组数据中特大或特小误差反映非常敏感, 近似反映了 DEM 的随机误差. 均方根误差也称为中误差, 是衡量数据精度的常用指标, 表示总误差 (包含系统误差和随机误差). 本文对研究区域的各

种统计指标进行了对比研究, 分析了研究区域内 DEM 数据高程精度和特征.

4 分析结果

4.1 SRTM 和 ASTER GDEM 高程精度

本文首先对 ICESat/GLAS 和 2 种 DEM 做了

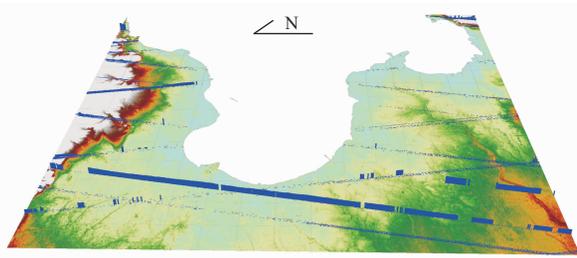


图 5 三维视图下的 ICESat/GLAS 数据叠加 SRTM DEM 数据(环渤海研究区)

Fig. 5 ICESat/GLAS data overlaid SRTM DEM data (Bohai gulf study area) in three-dimensional view

基本描述统计分析,结果如表 1 所示.从表 1 中可见,环渤海研究区的高程平均值位于 13 m 附近,3 种数据的均值差异都非常小,西南山地虽然山地较多,地势起伏比较大,但这 3 种高程平均值的差异并不大,其中 ICESat/GLAS 和 SRTM 比较接近,高程差只有 1.77 m,ICESat/GLAS 和 ASTER GDEM 的高程均值差异也仅 3.5 m.将环渤海研究区内 ICESat/GLAS 和 DEM 的高程差做直方图统计分析,得到高程差统计特征,如图 6 所示,ICESat/GLAS 与 SRTM 的高程差呈正态分布,均值为 1.32,标准差为 4.044.

根据 ICESat/GLAS 和 SRTM 高程的散点图,发现两种高程值呈线性相关,进一步做一元线性回归拟合,得到线性回归方程,线性方程斜率为 1.004,截距为 -1.381.从图 6b 可见,在 SRTM DEM 高程值 0 附近,有大量 ICESat/GLAS 高程值较高的点,这些点是由于去除粗差点不彻底所致.这些点的存在,影响了线性拟合精度.为了得到更高精度的拟合函数,可以对 ICESat/GLAS 三维激光点云数据做

滤波处理.本文仅根据统计分析的结果,进行了 2 次粗差剔除.从图 6 可知高程差呈正态分布,本文基于 3σ 准则(three-sigma rule)完成二次粗差剔除. 3σ 准则是最常用也是最简单的粗大误差判别准则,其基本原理为:由于高程差服从正态分布,则高程差的绝对值主要集中在均值附近,设高程差为 d_i , μ 为均值, σ 为标准差,则:

$$P(\mu - 3\sigma \leq d_i \leq \mu + 3\sigma) \approx 0.9973. \quad (6)$$

本文去掉高程差直方图中(0%~0.3%)与(99.7%~100%)区间的数据.对于环渤海地区,SRTM 此区间的点是高程差小于 -21 m 和大于 13 m 的点;ASTER 此区间的点是高程差小于 -27 m 和大于 23 m.西南研究区域,SRTM 此区间的粗差数据是高程差小于 -64.58 m 和大于 68.13 m;ASTER 此区间的粗差数据是高程差小于 -58.40 m 和大于 65.43 m.二次粗差剔除后各个高程值的描述性统计分析如表 2 所示.

由表 2 可见,二次粗差剔除后各项统计参数值都略有降低,但是变化幅度比较小.对于二次粗差去除后的数据,进一步进行高程差直方图统计分析,结果如图 7 所示.

从图 7 高程差的直方图统计结果可见,二次剔除粗差后的数据标准偏差更小了,同一区域的标准差比较接近.环渤海研究区 SRTM-ICESat/GLAS 的标准差约为 2.2 m,ASTER GDEM-ICESat/GLAS 的标准差为 5.6 m;而西南研究区域 SRTM-ICESat/GLAS 的标准差约为 20.6 m,ASTER GDEM-ICESat/GLAS 的标准差为 19.1 m,这两种数据在西南研究区的标准差远远高于环渤海地区.

分别对二次粗差剔除后的数据做散点图,发现

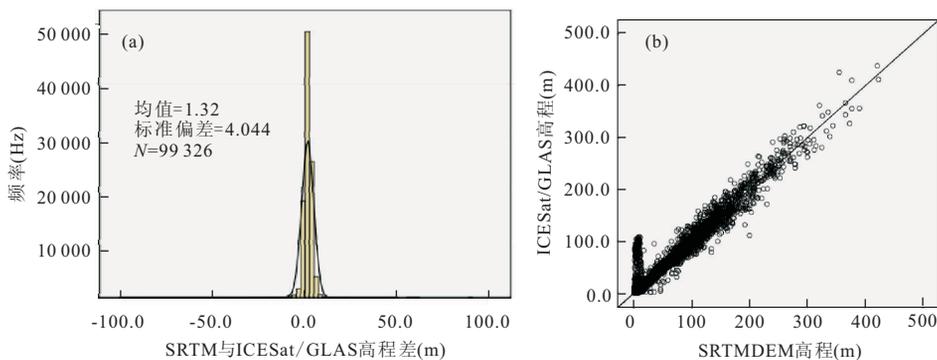


图 6 SRTM 与 ICESat/GLAS 高程统计分析

Fig. 6 SRTM and ICESat/GLAS elevation statistical analysis in the Bohai gulf study area

a 为环渤海研究区 SRTM 与 ICESat/GLAS 高程差的频率统计直方图,b 为环渤海研究区 SRTM 和 ICESat/GLAS 数据的散点图与一元线性回归拟合

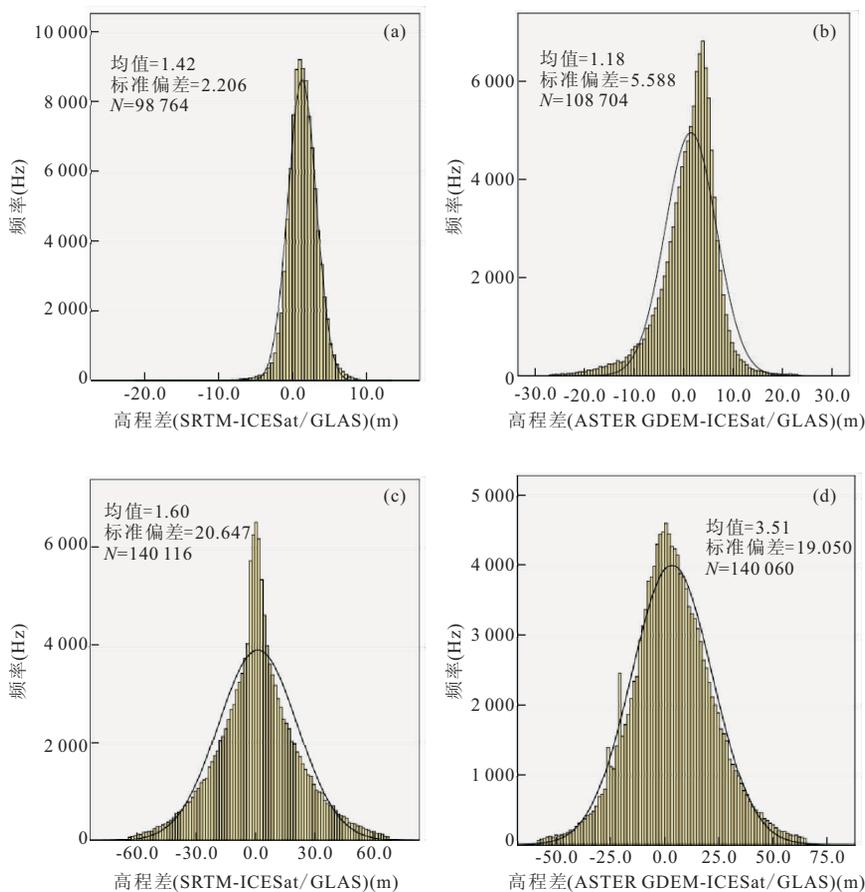


图 7 高程差直方图统计分析

Fig. 7 Histogram analysis of elevation difference

a. 环渤海研究区域 SRTM-ICESat/GLAS 的高程差直方图统计; b. 环渤海研究区域 ASTER GDEM-ICESat/GLAS 的高程差直方图统计; c. 西南研究区域 SRTM-ICESat/GLAS 的高程差直方图统计; d. 西南研究区域 ASTER GDEM-ICESat/GLAS 的高程差直方图统计

表 3 高程差统计值

Table 3 The statistical value of elevation difference

统计参数	环渤海区域		西南研究区	
	SRTM-GLAS	ASTER-GLAS	SRTM-GLAS	ASTER-GLAS
样本点数	98 764	108 704	140 116	140 060
均值(m)	1.42	1.18	1.60	3.51
标准差(m)	2.21	5.59	20.65	19.05
RMSE(m)	2.62	5.71	20.71	19.37
方差(m)	4.87	31.22	426.30	362.89

线性相关性得到很大提高,已经没有了图 6 中原点附近的不规则点聚集. 进一步对两个研究区域的数据做线性回归拟合分析,得到线性回归参数和线性回归曲线,如图 8 所示,两个区域的 SRTM 和 ASTER GDEM 两种数据和 ICESat/GLAS 数据都表现出强相关性,回归拟合直线斜率 x 的系数均接近 1,而 R^2 也接近 1,具有较高的线性拟合优度. 对回归方程的显著性做 ANOVA 检验,显著性水平检测值 p 近似为 0,验证了研究区域的这两种高程数据与 IC-

ESat/GLAS 的线性关系显著.

研究区域的高程差统计值如表 3 所示, RMSE 值反映了研究区域中数据的高程精度. SRTM 和 ASTER GDEM 在环渤海研究区域内的高程精度远高于西南地区的精度. 在同一个研究区域之内,环渤海地区的 SRTM 精度为 2.62 m 高于 ASTER GDEM 的 5.71 m;而西南研究区的 SRTM 数据的精度为 20.71 m,略小于 ASTER GDEM 的 19.37 m 精度.

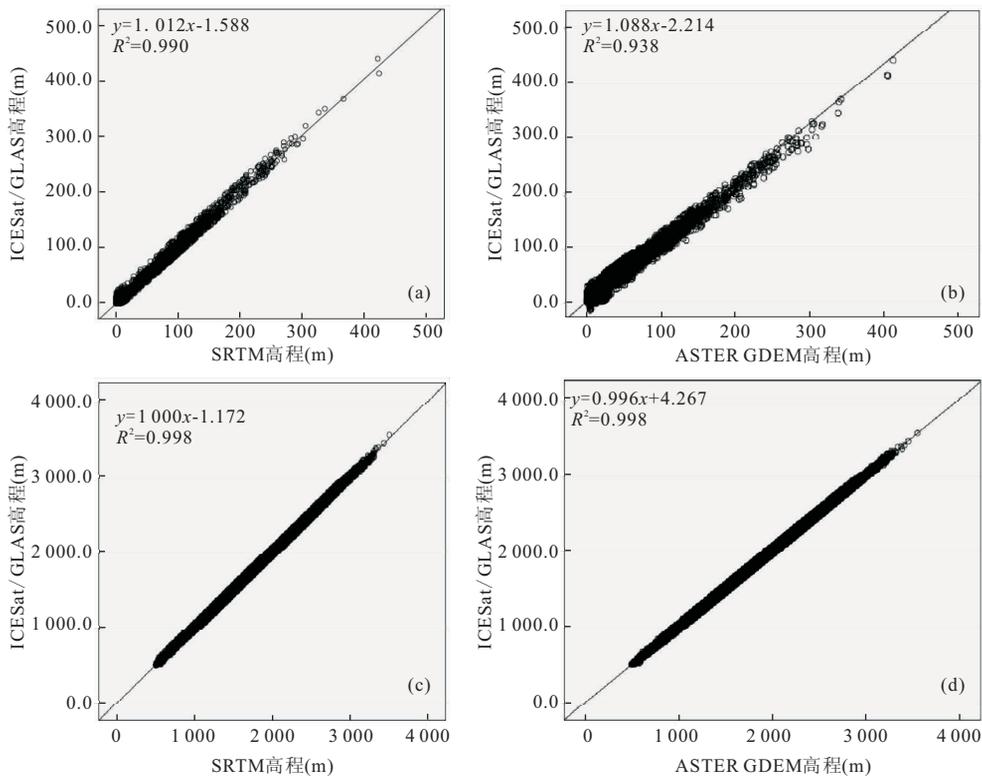


图 8 SRTM 高程和 ICESat/GLAS 高程值的线性回归拟合

Fig. 8 Correlation between DEM elevation and ICESat/GLAS elevation

a. 环渤海研究区域 SRTM 和 ICESat/GLAS 的线性回归拟合; b. 环渤海研究区域 ASTERGDEM 和 ICESat/GLAS 的线性回归拟合; c. 西南研究区域 SRTM 和 ICESat/GLAS 的线性回归拟合; d. 西南研究区域 ASTER GDEM 和 ICESat/GLAS 的线性回归拟合

4.2 DEM 精度与地形的关系

把 DEM 地形数据和高程差做叠加分析, 分析地形对高程精度的影响. 将环渤海研究区域的 SRTM 和 ICESat 高程差在三维视图下拉升, 将离散点按线状模式三维显示, 叠加在 DEM 数据上, 可以直观显现高程差异与地形的关系. 如图 9 所示, 地势起伏较大的区域(环渤海北部地区), 高程差异明显; 地形平坦的南部地区, 高程差普遍较小. 同时, 沿海区域, 水域对 DEM 的高程精度影响也较大.

经过三维可视化分析得出结论: 高程误差随地形起伏增大而增大. 进一步定量证明该结论, 将高程差与 DEM 高程值联合分析. 为了比较同一坐标点的 DEM 和 ICESat/GLAS 的高程值, 在两个研究区域各选一个条带的激光雷达数据. 西南地区选取 2006 年 6 月 20 日条带数据, 剔除粗差后该条带提取 ASTER GDEM 数据点 896 个, 提取 SRTM 数据点 872 个. 渤海地区选取 2007 年 10 月 31 日的激光雷达条带数据, 剔除粗差后提取 SRTM 点数 1 934 个, 提取 ASTER GDEM 点数 1 931 个, 选择的条带均为南北横跨整个研究区域. 分别制作激光雷达条

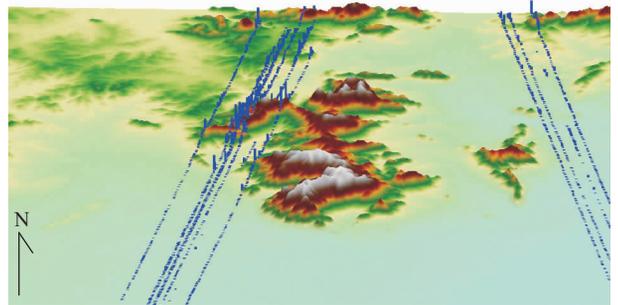


图 9 DEM 高程精度与地形的关系三维可视化分析. 将高程差(3D 夸张因子为 10)在三维视图下拉升, 叠加到三维 DEM 模型的场景

Fig. 9 Three-dimensional visualization analysis of the relationship between DEM elevation accuracy and terrain (3D exaggeration factor of elevation difference is 10)

带数据点的 DEM 高程剖面图、ICESat/GLAS 高程曲线图和 高程差对比图(图 10).

从图 10 可以看出, 环渤海研究区, SRTM 和 ASTER GDEM 的高程差表现出相似特点: 高程变化较大的区域高程差也较大. 图 10a 和 10b, ID 为 1 800 采样点附近是研究区北面的山地, 该区域高程

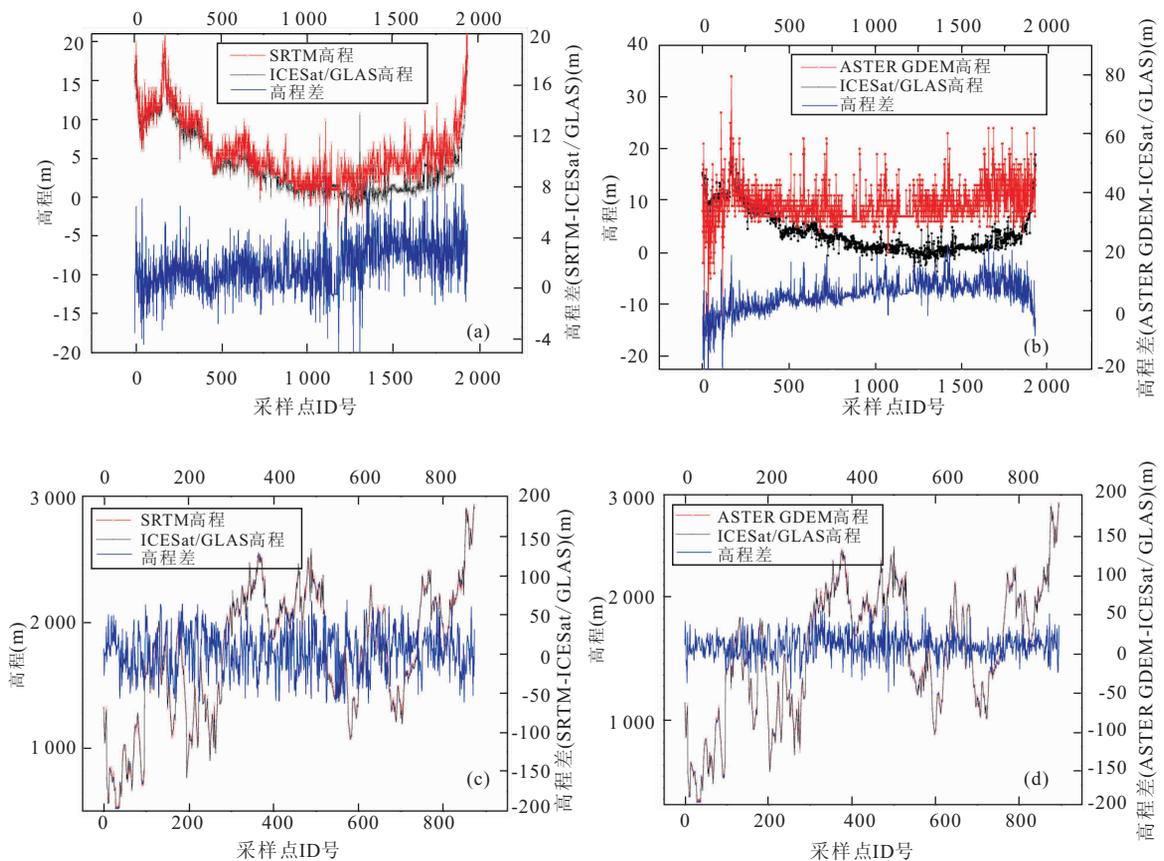


图 10 ICESat/GLAS 和 DEM 的高程曲线和高程差对比

Fig. 10 Comparative analysis of elevation profile and elevation difference

a. 渤海研究区的 ICESat/GLAS 和 SRTM 的高程曲线和高程差; b. 渤海研究区的 ICESat/GLAS 和 ASTER GDEM 的高程曲线和高程差; c. 西南研究区的 ICESat/GLAS 和 SRTM 的高程曲线和高程差; d. 西南研究区的 ICESat/GLAS 和 ASTER GDEM 的高程曲线和高程差

表 4 环渤海研究区域分类高程差统计

Table 4 Statistics by classification of elevation difference in Bohai gulf study area

统计参数	环渤海区域 (<20 m)		环渤海区域 (>20 m)	
	SRTM-GLAS	ASTER-GLAS	SRTM-GLAS	ASTER-GLAS
样本点数	86 005	98 506	12 759	10 198
均值(m)	1.49	1.91	0.93	-5.90
标准差(m)	1.86	4.43	3.75	9.36
RMSE(m)	2.39	4.83	3.86	11.07
方差(m)	3.46	19.67	14.07	87.68

表 5 西南研究区分类高程差统计

Table 5 Statistics by classification of elevation difference in Southwest study area

统计参数	西南研究区 (<1 870 m)		西南研究区 (>1 870 m)	
	SRTM-GLAS	ASTER-GLAS	SRTM-GLAS	ASTER-GLAS
样本点数(m)	63 851	64 187	76 265	75 873
均值(m)	1.55	2.25	1.64	4.58
标准差(m)	20.65	17.92	20.64	19.90
RMSE(m)	20.71	18.06	20.71	20.42
方差(m)	426.51	320.98	426.11	396.05

差波动较大. 在 ID 为 1 000~1 200 采样点附近, 高程差有较大波动, 从地形图和实地考察可知, 此区间是靠近渤海湾, 分布着大量的盐田和水产养殖区域, 是水域比较集中的地区, 因此可知, 水域对 DEM 的精度影响也比较大. 同样, 在 ID 为 160 采样点附近, 受黄河流经的影响, DEM 波动较大. 西南地区, ID 为 150 和 500 的采样点附近, 高程差有较大波动, 该点附近是所选 ICESat/GLAS 条带中, 地形起伏最大的两个位置, 一个位于南部山谷位置, 另一个位于北部山峰. 图 10c 和 10d 对比可知, 西南研究区域内, ASTER GDEM 的高程差平均波动幅度小于 SRTM 的高程差波动幅度.

为了进一步分析地形对高程精度的影响, 将环渤海研究区域内的 DEM 高程值分成 0~20 m 和 20 m 以上两组; 将西南研究区域的数据按照 DEM 均值分成小于 1 870 m 和 1 870 m 以上 2 组, 分别统计 2 组内的高程差的各种参数, 结果如表 4 和表 5 所示.

表 4 和表 5 统计结果显示, 环渤海地区的两组数据, 高程精度有较大差异, 而西南山地的分组统计结果差异不明显. 环渤海研究区域, 对于高程小于 20 m 的点, SRTM 高程精度达到了 2.39 m, ASTER GDEM 的精度达到 4.83 m, 精度均远远高于另一组的 3.86 m 和 11.07 m. 原因在于小于 20 m 的点基本都分布于近海的平坦区域, 而高于 20 m 的点多分布于研究区域北面山区, 这些点影响了高程精度. 西南山地的两组统计结果都接近于 20, 和不分组的统计结果差异不明显.

5 结论

本文利用研究区域超过 10 万个 ICESat/GLAS 星载激光雷达离散点数据为样本, 验证了中国沿海低海拔平原地区和西南高海拔山地的 ASTER GDEM 和 SRTM 的精度. 在沿海低海拔地区(高程值小于 20 m), SRTM 的高程精度达到 2.39 m, 远远高于标称的 16 m 精度, 可以作为地形分析、水文、水动力学模型理想的数据源. 但 SRTM 和 ASTER DEM 哪种精度更高不能一概而论. 本文对比分析可知, 不同研究区域有不同的高程精度. 研究区域低海拔地区(高程值小于 20 m) SRTM 高程精度要高于 ASTER GDEM. 分析了 DEM 精度与地形的关系, SRTM 和 ASTER GDEM 的误差随地形高程增加而增大, 地表水域覆盖对 DEM 的精度影响也较大.

建立了 SRTM、ASTER GDEM 与 ICESat/GLAS 的一元线性回归模型, 由于地面特征的差异, 各个区域不能得到统一的回归方程, 但特定地区或有共同特征的区域可以建立较确定的回归模型, 并用此模型在一定范围内改善 DEM 数据的精度. 本文虽然根据高程值进行分组, 统计了各个研究区域的 DEM 高程精度, 但没有进一步分析坡度、坡向这两个地学特征参数对精度的影响. 今后的研究, 将结合坡度、坡向参数建立多元回归模型, 得到更精确的高程预测模型.

致谢: 感谢中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站提供 SRTM 数据, 日本 METI 和美国 NASA 提供 ASTER GDEM 数据, 美国 NSIDC 提供 ICESat/GLAS 数据. 感谢审稿人提出的建设性意见和建议.

References

- Abshire, J. B., X. Sun, Riris, H., et al., 2005. Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat Mission: On-Orbit Measurement Performance. *Geophysical Research Letters*, 32(21): L21S02. doi:10.1029/2005GL024028
- ASTER GDEM Validation Team, 2009. ASTER Global DEM Validation, Summary Report. Available at: https://lp-daac.usgs.gov/sites/default/files/public/aster/docs/ASTER_GDEM_Validation_Summary_Report.pdf. Accessed 15th May 2013.
- Bhang, K. J., F. W. Schwartz, Braun, A. 2007. Verification of the Vertical Error in C-Band SRTM DEM Using ICESat and Landsat-7, Otter Tail County, MN. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(1): 36-44. doi:10.1109/TGRS.2006.885401
- Carabajal, C. C., Harding, D. J., 2005. ICESat Validation of SRTM C-Band Digital Elevation Models. *Geophysical Research Letters*, 32(22): L22S01. doi:10.1029/2005GL023957
- Carabajal, C. C., Harding, D. J., 2006. SRTM C-Band and ICESat Laser Altimetry Elevation Comparisons as a Function of Tree Cover and Relief. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(3): 287-298.
- Chen, J. Y., 2005. Quality Evaluation of Topographic Data from SRTM3 and GTOPO30. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 30(11): 941-944 (in Chinese with English abstract).
- E, D. C., Shen, Q., Xu, Y., et al., 2009. High-Accuracy Topographical Information Extraction Based on Fusion of ASTER Stereo-Data and ICESat/GLAS Data in Antarctica. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 39(3): 351-359 (in Chinese with English abstract).

- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2). doi: 10.1029/2005RG000183
- Gorokhovich, Y., Voustianiouk, A., 2006. Accuracy Assessment of the Processed SRTM-Based Elevation Data by CGIAR Using Field Data from USA and Thailand and Its Relation to the Terrain Characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 104(4): 409—415. doi: 10.1016/j.rse.2006.05.012
- Hirt, C., Filmer, M., Featherstone, W., 2010. Comparison and Validation of the Recent Freely Available ASTER-GDEM Ver1, SRTM Ver4. 1 and GEODATA DEM-9S Ver 3 Digital Elevation Models over Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57(3): 337—347. doi: 10.1080/08120091003677553
- Hvidegaard, S. M., Sørensen, L. S., Forsberg, R., 2011. ASTER GDEM Validation Using LiDAR Data over Coastal Regions of Greenland. *Remote Sensing Letters*, 3(1): 85—91. doi: 10.1080/01431161.2010.527389
- Koch, A., Lohmann, P., 2000. Quality Assessment and Validation of Digital Surface Models Derived from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). *Proceedings, IAPRS*, 33.
- Nikolakopoulos, K. G., Kamaratakis, E. K., 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
- Rabus, B., Eineder, M., Roth, A., et al., 2003. The Shuttle Radar Topography Mission—A New Class of Digital Elevation Models Acquired by Spaceborne Radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57(4): 241—262. doi: 10.1016/S0924-2716(02)00124-7
- Reuter, H. I., Nelson, A., Strobl, P., et al., 2009. A First Assessment of Aster GDEM Tiles for Absolute Accuracy, Relative Accuracy and Terrain Parameters. IGARSS, 12-17 July 2009, Cape Town, IEEE. doi: 10.1109/IGARSS.2009.5417688
- Rodriguez, E., Morris, C. S., Belz, J. E., 2006. A Global Assessment of the SRTM Performance. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(3): 249—260.
- Schutz, B. E., Zwally, H. J., Shuman, C. A., et al., 2005. Overview of the ICESat Mission. *Geophysical Research Letters*, 32(21): L21S01. doi: 10.1029/2005GL024009
- Simard, M., Rivera-Monroy, V. H., Mancera-Pineda, J. E., et al., 2008. A Systematic Method for 3D Mapping of Mangrove Forests based on Shuttle Radar Topography Mission Elevation Data, ICESat/GLAS Waveforms and Field Data: Application to CiÉNaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Remote Sensing of Environment*, 112(5): 2131—2144. doi: 10.1016/j.rse.2007.10.012
- Sun, G., Ranson, K., Kharuk, V., et al., 2003. Validation of Surface Height from Shuttle Radar Topography Mission Using Shuttle Laser Altimeter. *Remote Sensing of Environment*, 88(4): 401—411. doi: 10.1016/j.rse.2003.09.001
- Sun, G., Ranson, K., Kimes, D., et al., 2008. Forest Vertical Structure from GLAS: An Evaluation Using LVIS and SRTM Data. *Remote Sensing of Environment*, 112(1): 107—117. doi: 10.1016/j.rse.2006.09.036
- Tang, C., Qi, X., Ding, J., et al., 2010. Dynamic Analysis on Rainfall-Induced Landslide Activity in High Seismic Intensity Areas of the Wenchuan Earthquake Using Remote Sensing Image. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(2): 317—323 (in Chinese with English abstract).
- Toutin, T., 2002. Impact of Terrain Slope and Aspect on Radargrammetric DEM Accuracy. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57(3): 228—240. doi: 10.1016/S0924-2716(02)00123-5
- Toutin, T., 2008. ASTER Dems for Geomatic and Geoscientific Applications: A Review. *International Journal of Remote Sensing*, 29(7): 1855—1875. doi: 10.1080/01431160701408477
- Wang, X., Zhou, A. G., Siebert, F., et al., 2012. Glacier Temporal-Spatial Change Characteristics in Western Nyainqentanglha Range, Tibetan Plateau 1977—2010. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(5): 1082—1092 (in Chinese with English abstract).
- Ye, Q. H., Yao, T. D., Chen, F., et al., 2008. Response of Glacier and Lake Covariations to Climate Change in Mapam Yumco Basin on Tibetan Plateau during 1974—2003. *Journal of China University of Geosciences*, 19(2): 135—145.

附中文参考文献

- 陈俊勇, 2005. 对 SRTM3 和 GTOPO30 地形数据质量的评估. *武汉大学学报(信息科学版)*, 30(11): 941—944.
- 鄂栋臣, 沈强, 徐莹, 等, 2009. 基于 ASTER 立体数据和 ICESat/GLAS 测高数据融合高精度提取南极地区地形信息. *中国科学(D辑:地球科学)*, 39(3): 351—359.
- 唐川, 齐信, 丁军, 等, 2010. 汶川地震高烈度区暴雨滑坡活动的遥感动态分析. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(2): 317—323.
- 王旭, 周爱国, SIEGERT, F., 等, 2012. 念青唐古拉山西段冰川 1977—2010 年时空变化. *地球科学——中国地质大学学报*, 37(5): 1082—1092.