

引用格式: Zhang Huan, Li Hongyi, Li Haojie, *et al.* Accuracy Evaluation of Remote Sensing Elevation Data in Alpine Mountains based on Airborne LiDAR[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(6): 1311-1320. [张欢, 李弘毅, 李浩杰, 等. 基于机载LiDAR的高寒山区遥感高程数据精度评估[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(6): 1311-1320.] DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.6.1311

基于机载LiDAR的高寒山区遥感高程数据精度评估

张欢^{1,2}, 李弘毅¹, 李浩杰^{1,2}, 车涛^{1,3}

1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049;
3. 中国科学院黑河遥感站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 遥感高程数据是获取缺资料地区DEM(Digital elevation models)数据的重要手段。然而, 由于高寒山区实地高程测量稀少, 难以对多源遥感DEM数据进行统一验证。ICESat-2等新的遥感高程数据在高寒山区也缺乏相应的精度评估。针对此问题, 以青藏高原东北缘的冰沟流域作为研究区, 采用机载航空遥感获取的大范围LiDAR(Light Detection And Ranging)DEM数据对新产品ICESat-2 ATL06(Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2, Land Ice Height)、ALOS DEM(12.5 m分辨率)以及新版本SRTM V3(SRTM Arc-Second Global 1 V003)、ASTER GDEM V3(ASTER Global DEM)进行验证, 并分析地形因子与均方根误差RMSE的关系。研究表明: ICESat-2 ATL06数据在高寒山区的RMSE为0.747 m。由于其较高的精度, 可用于验证缺资料地区的其他遥感高程数据。其他遥感高程数据的精度都相对较低, ALOS 12.5 m数据的RMSE为5.284 m; ASTER GDEM V3版本的RMSE为9.903 m。实验所采用的4种遥感高程数据与机载LiDAR DEM均具有较高的相关性, 相关系数在0.998与1.000之间。实验还揭示了坡度是影响遥感DEM精度的主要因素。除ICESat-2 ATL06外, 其他高程数据的RMSE均随坡度的增大先减小再增大, 且都存在一个最佳坡度值。鉴于地形复杂多样的冰沟流域具有青藏高原高寒山区的典型特征, 多源遥感DEM数据在该区域的验证结论具有较好的代表性, 可为相似地区DEM数据的使用和评估提供重要的知识补充。

关键词: 遥感测高; ICESat-2; LiDAR; DEM; 高寒山区

中图分类号: K90; P208 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)06-1311-10

1 引言

2000年美国航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、国家地理空间情报局(National Geospatial-Intelligence Agency, NGA)、德国和意大利航天局共同合作利用航天飞机雷达地形测图任务(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)首次完成了地球上最完整、分辨

率最高的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)^[1]。自那时以来, 数字高程模型在水文学、地貌学、地图制图等研究中被广泛应用。全球各种分辨率的DEM数据陆续免费发布, 为全球的地学分析研究提供了大量有效的数据。

目前可用的多源遥感高程数据主要有: GTOPO30 1 km^[2]、SRTM 30 m^[3]与90 m、ASTER GDEM

收稿日期: 2020-10-20; 修订日期: 2021-09-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41971399), 青海省基础研究项目(2020-ZJ-731), 中国科技基础资源调查项目(2017FY100503)资助。

作者简介: 张欢(1996-), 女, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要从事寒区水文遥感研究。E-mail: zhanghuan192@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 李弘毅(1981-), 男, 四川西充人, 研究员, 主要从事寒区水文模拟研究。E-mail: lihongyi@lzb.ac.cn

30 m^[4]、ALOS 12.5m^[5]与 30 m^[6]、TanDEM-X 12 m, 30 m与 90 m^[7]、ICESat (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite, ICESat)^[8]等。

目前 SRTM 数据广泛使用的是 V4.1 版本,主要用于冰川研究,而 30 m 分辨率 SRTM 数据于 2014 年才在全球免费提供,该数据可为偏远地区提供有价值的地形信息^[9]。ASTER GDEM 数据精度较之前的 SRTM 3、GTOPO30 有较大提高^[10],可对其他高程数据进行有效填补。现阶段针对 SRTM、ASTER 的评估主要是利用 GPS^[11]、ICESat 等^[12]作为参考高程,集中评估我国中部、东部地区,但是在流域尺度上并没有进行相关的验证分析。

ALOS DEM 数据主要有商业上分发的 5 m 分辨率 DEM 数据以及重采样的 30 m 分辨率数据 (AW3D30)^[13],该数据均方根误差可达 5 m 左右。除此之外 ALOS 还有很少被提及的 12.5 m 分辨率数据,它是一种利用辐射校正 (RTC) 技术进行改良的产品,数据本身存在一些问题,在使用时需要进行验证。目前,ALOS DEM 数据前人的验证主要集中在 30 m 的 AW3D30,对 PALSAR 传感器获得的 12.5 m 数据还没有验证过。

高分辨率立体测绘卫星——资源三号星制作的 DEM 数据,其均方根误差小于 5 m^[14]。另一个高分辨 TanDEM-X 雷达观测卫星,提供了 12 m 分辨率 DEM 数据。ADIV 等^[7]使用机载 LiDAR 数据在一些典型地区验证 TanDEM-X,表明与其他全球 DEM 数据相比具有明显的优越性,其均方根误差最小能到 1 m。

ICESat 测高卫星数据于 2003 年发布,精度可达厘米级^[8],经常用于验证 SRTM、ASTER 等数据的精度^[15]。而 ICESat-2 是 ICESat 的后续任务。与 ICESat 相比,ICESat-2 由 2×3 的波束阵列形式形成了 3 对沿轨激光束测量地面的模式,沿轨间距由之前的 170 m 变为 0.7 m,激光脚点大小也由 70 m 变为 17 m^[16],采样点的密度明显提高,受坡度的影响也明显降低。也就是说 ICESat-2 地面激光点更密集,且提供了更精细的算法^[17]。目前有利用 ICESat-2 进行水位^[18]和植被等^[19]的研究,取得了令人满意的结果。Wang 等^[19-20]利用 LiDAR 数据对 ICESat-2 二级产品 ATL03 (Global Geolocated Photon Data) 现有的地面高程反演性能进行评价,表明现有的地面光子识别与去噪算法是有效的。但是,还没有研究对 ICESat-2 的 Level 3A 级 ATL06 数据进行

验证。与其他 DEM 数据的误差对比,ICESat-2 ATL06 数据具有更高的分辨率、更大的覆盖范围和更好的优势性,无论在任何坡度情况下均具有最好的表现。

激光点云 LiDAR 获得的 DEM 数据能够有效地获取地形特征^[21],且获取的高程精度可达厘米级,能有效地评估其他 DEM 数据。比如赵尚民等^[14]利用机载激光点云生成的 DEM 数据对山西省中部获取的资源三号 DEM、ASTER GDEM 等高程数据进行分析,得到了较好的结果。

NASA 发布数据时虽然给出了某些 DEM 的全局精度指标,并且在数据丰富的区域也得到了较好的验证,但是在缺乏地面实测资料的高海拔地区高程精度会存在区域尺度上的空间变化。这些遥感高程数据在高海拔地区还没有得到统一的验证,且发展高分辨率、高精度的 DEM 数据对高寒山区水文与陆面过程模拟至关重要。针对此问题,以高寒山区典型区域——青藏高原东北缘冰沟流域为研究区,将获取的 ICESat-2 ATL06、ALOS DEM、SRTM V3、ASTER GDEM 数据利用激光点云数据进行统一验证,且评估坡度等地形因子对误差的影响。

2 研究区和数据源

2.1 研究区概况

研究区为青藏高原东北缘冰沟流域 (图 1)。流域面积约为 30.28 km²,海拔在 3 366~4 344 m 间。地形复杂呈西北走向,且山区坡度较大,有较为均一的土壤分布,存在大量的季节性冻土和多年冻土。李弘毅等^[22]在此的观测表明,冰沟流域多为季节性降雪,降雪期阳坡积雪少,阴坡积雪厚。降水集中于 6~8 月。植被覆盖呈现垂直地带性,但大多以草地为主。

2.2 数据源

实验所使用的数据主要有:作为参考高程的 LiDAR DEM 数据,需验证的新产品 ICESat-2 ATL06 激光测高数据、2009 年与 2010 年 ALOS DEM (12.5 m)、SRTM V3、ASTER GDEM 数据以及用于数据筛选的 MODIS 地表类型产品 MCD12Q1 数据。关于所获取的 DEM 数据见表 1。

(1) LiDAR 机载激光扫描数据。该数据源于 HiWATER 遥感试验^[23],于 2014 年 9 月 23 日至 10 月 5 日收集。在黑河上游冰沟流域利用运 12 飞机搭载的 ALS70、RCD30 开展实验,该设备能在高空

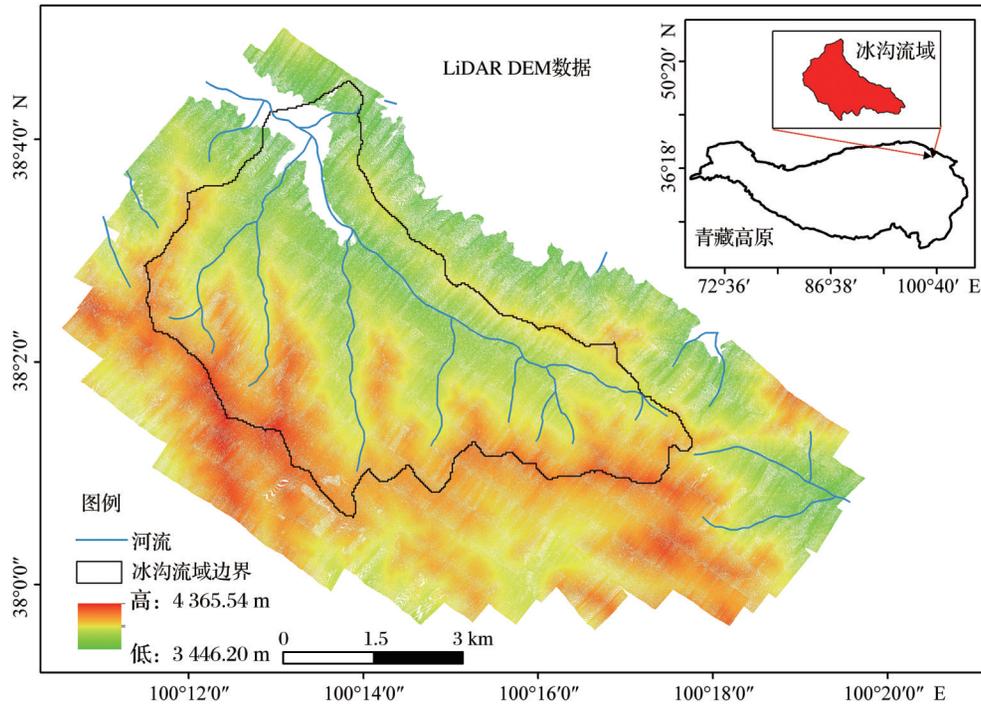


图 1 冰沟流域 LiDAR 制作的 DEM 图

审图号:GS(2016)1569

Fig.1 DEM made from LIDAR dataset of the BingGou basin

表 1 多种类型 DEM 数据简介

Table 1 Introduction to various DEM data

DEM 数据	LiDAR DEM	ICESat-2 ATL06	ALOS DEM 12.5 m	SRTM V3	ASTER GDEM
传感器	ALS70	ATLAS	PALSAR	SRTM	ASTER
获取时间	2014	2018~2019	2006~2011	2000	2019
空间分辨率/m	1	20	12.5	30	30
参考椭球	WGS84	WGS84	WGS84	WGS84/EGM96	WGS84/EGM96
投影方式	UTM 投影	UTM 投影	UTM 投影	UTM 投影	UTM 投影
数据格式	Geo Tiff	HDF5	Geo Tiff	HGT	Geo Tiff
覆盖范围	冰沟流域	90°N~90°S	80°N~80°S	60°N~56°S	83°N~83°S

作业时加倍地面点的密度,保证数据获取的完整性。飞行面积 60 km², 视场角为 28°, 绝对航高 5 500 m, 平均点密度 1.6 点/m²。生成 DEM 之前数据经过了参数检校、TMatch、去航线重叠与人工编辑,并与地面实测高程点进行了对比,保证了数据质量。通过最近邻插值,生成 1 m 的 DEM 数据,后统一称为 LiDAR DEM 数据。实验中,我们以此高精度的 DEM 数据作为真值。

(2) ICESat-2 数据。2018 年 10 月由 NASA 发布,携带的是先进地形激光高度计系统(Advanced Topographic Laser Altimeter System, ATLAS)。目前发布的数据产品有 Level1、Level2、Level3A 级数据。实验使用的是 ICESat-2 Level3A 级的 ATL06(Land Ice Height)002 版本数据,该数据共有 6 个地面轨迹(GT1L, GT1R, GT2L,

GT2R, GT3L, GT3R), L 为强激光束, R 为弱激光束,能量比约为 4:1。对于 6 个激光束,为了降低弱激光束的不确定性,选用 3 个强激光束(GT1L, GT2L, GT3L),对每一个强激光束提取经纬度、高程等信息^[24]。

(3) ALOS DEM 12.5 m 数据。ALOS 是日本发射的对地观测卫星,采用了先进的陆地观测技术,搭载了 3 个传感器。实验使用的是 PALSAR 传感器经过辐射地形校正 RTC 消除影响后产生的 DEM 数据,该数据根据 NED1、NED2、NED13、SRTMGL1、SRTMUS1 等 DEM 制作。数据来源于 ASF DAAC (<https://search.asf.alaska.edu/>)。考虑到冰雪或土壤冻胀可能会引起地表变形,故选取冬夏两期数据(2009 年 2 月 12 日、2010 年 8 月 18 日)。

(4) Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second V003数据。简称SRTM V3,实验使用版本为V003,该数据是利用雷达干涉测量技术生成的DEM数据,主要利用Terra卫星的ASTER、GMTED2010、NED数据填补早期版本的空值。

(5) ASTER Global DEM数据。简称ASTER GDEM,是NASA联合日本经济产业省(METI)发布的第一个覆盖地球99%陆地表面的30 m分辨率数据。采用2019年发布的V3版本数据,共搜集188万个立体像对数据制作DEM,与V2相比V3在水体处理中实现河流湖泊分离,进行了去云处理,剔除了异常值;在置信度95%水平下,高程精度为7~14 m。

(6) MCD12Q1(MODIS)地表类型产品。该产品分辨率为500 m,提供全球的陆地地表类型数据。本实验采用IGBP(International Geosphere-Biosphere Programme)国际地球生物圈计划定义的地表覆盖类型。有效值为0~16,255与254表示填充值和未分类值,0代表水域,15代表冰雪区域。该数

据主要用于剔除多源测高数据在水体、冰雪区域的分布。

ICESat-2 ATL06、SRTM V3、ASTER GDEM、MCD12Q1均来源于NASA官方网站(<https://search.earthdata.nasa.gov/search>)。

3 方法

首先将经过前期处理的点云数据采用最近邻、反距离加权、自然邻域等插值方法插值到1 m,取插值精度最高的数据记为LiDAR DEM,并重采样到与多源DEM相匹配的分辨率上。然后将SRTM V3、ASTER GDEM垂直基准转换到WGS84椭球体上,计算出LiDAR DEM与这些高程数据的高程差,且均记为 dh 。为了消除云雾与地形的影响,剔除 dh 值在 ± 100 m以外的点与坡度大于 50° 的点。最后进行高程配准检查。为了了解坡度对RMSE的影响,将LiDAR DEM的坡度进行分级,计算其与多源DEM的均方根误差RMSE。方法见流程图(图2)。

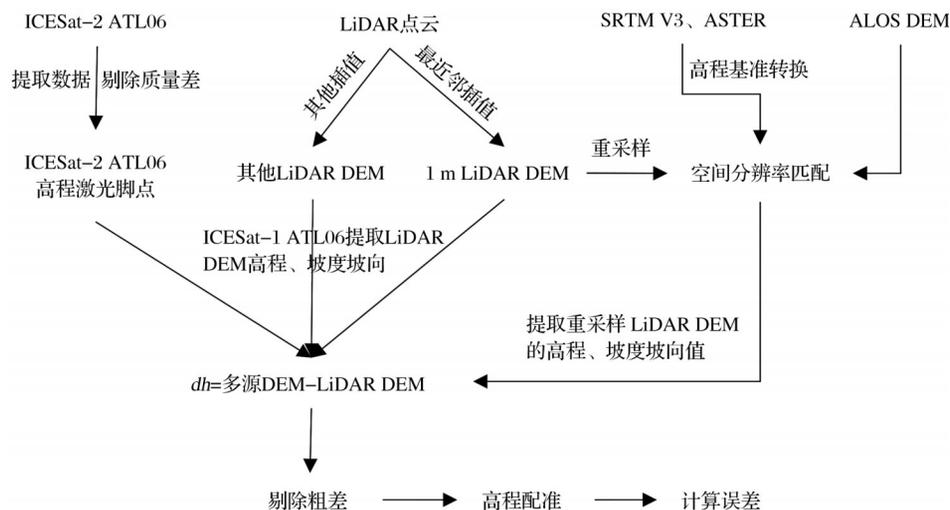


图2 数据处理流程图

Fig.2 Data processing flow chart

3.1 LiDAR数据生成DEM

将LiDAR点云las数据采用最近邻插值生成1 m的LiDAR DEM数据(图1),并计算其坡度与坡向。同时为了解点云las数据生成DEM的不同插值方法对验证多源DEM精度产生的影响。比较了各插值方法验证ICESat-2 ATL06的均方根误差RMSE和标准差SD变化,得到的结果表明:使用最近邻方法插值精度最高,反距离加权法次之,精度最高与最低的插值方法RMSE相差大约0.022 m。因此,本研究认为在冰沟流域LiDAR点云生成

DEM时选择的插值方法不会对验证多源DEM数据产生较大影响。

3.2 ICESat-2 ATL06高程值计算

将ICESat-2 ATL06的强波束分别提取经纬度、高程、时间、质量标志等参数,剔除表面信号置信度为1的点(表面信号置信度为1或0),并利用MCD12Q1剔除位于水域和冰雪区域的点,剩余的激光点提取对应的LiDAR DEM、坡度坡向、不同插值方法生成的DEM高程数据。ICESat-2 ATL06高程值计算公式如下:

$$h_{ICESat-2\ ATL06} = h_{mean} + tx_med_corr + fpb_med_corr(1)$$

其中: $h_{ICESat-2\ ATL06}$ 是 ICESat-2 ATL06 高程值; h_{mean} 是激光分段中每一段的中心高度值; tx_med_corr 是脉冲发射形状校正; fpb_med_corr 是第一光子偏置校正,其中脉冲发射形状校正与第一光子偏置校正都是基于中值进行校正的。单位均为 m。

3.3 高程基准转换

为了将多源 DEM 数据进行一致的比较,且考虑到 EGM96 基准带来的误差,我们将参考基准为 EGM96 的 SRTM V3、ASTER GDEM 转换到 WGS84 椭球体上。首先将 SRTM V3、ASTER GDEM 每个网格单元水平和垂直坐标作为文本文件输出,然后调用 NGA 提供的 EGM96 5' 水准进行转换。提取到水准高之后,通过以下公式转换到椭球高。

$$h = H + N \quad (2)$$

其中: h 是椭球高; H 是正交高程; N 为大地水准面起伏,单位均为 m。

3.4 DEM 配准与评估

经过高程基准转换之后,考虑到 ALOS DEM、SRTM V3、ASTER GDEM 与 LiDAR DEM 空间分辨率不一致,因此将 1 m LiDAR DEM 数据重采样到 12.5 m 与 30 m,保证空间分辨率一致。然后计算多源 DEM 与 LiDAR DEM 数据高程差 dh (公式(3)),剔除受云雾与地形影响的点,即高程差在 ± 100 m 以外的数据点和坡度大于 50° 的点。由于传感器的不稳定和不同传感器获取的数据可能存在一定的错误和偏差,导致两数据虽然在同一坐标系下,但是存在同名点不匹配的情况。因此,采用 Nuth 等^[24]的方法检查多源 DEM 与 LiDAR DEM 数据是否需要配准,若需配准,使用公式 4 进行数据配准。实验主要采用我国测绘局与美国 USGS 采用的高程精度评价标准均方根误差 RMSE 来评价多源 DEM 数据(公式(5))。

$$dh = h_{other} - h_{LiDAR} \quad (3)$$

$$\frac{dh}{\tan(\alpha)} = a * \cos(b - \psi) + c \quad (4)$$

$$c = \frac{dh}{\tan(\alpha)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{other} - h_{LiDAR})^2}{n}} \quad (5)$$

其中: h_{other} 为多源 DEM 的高程; h_{LiDAR} 为 LiDAR

DEM 获取的高程值; n 为数据点总数; a 为平移量; b 为方位角; c 为两个高程数据集的平均偏差; dh 为两数据集的高差; α 为坡度; Ψ 为坡向;参数 a 、 b 、 c 通过最小二乘法拟合,若存在余弦关系则利用公式 4 所得参数进行配准。实验所获得的数据经过检查,水平位移量小于 0.5 m,不需要再进行迭代配准(图 3,以 ALOS 为例),并依此分析了数据之间的相关性。

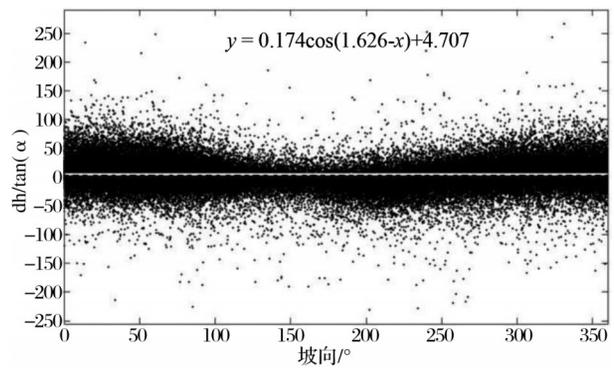


图 3 高程配准检查图

Fig.3 Elevation registration check chart

经检查,ICESat-2 只需剔除质量粗差,而其余的 DEM 数据,除 ALOS DEM 需要将研究区边界的数据粗差剔除外,无需再剔除 ± 100 m 以外的异常值,SRTM V3 和 ASTER GDEM 则都需要剔除异常值。考虑到冰沟流域山区坡度较大,根据地形起伏将 LiDAR DEM 坡度分为 8 类 ($0\sim 1^\circ$ 、 $1\sim 5^\circ$ 、 $5\sim 10^\circ$ 、 $10\sim 15^\circ$ 、 $15\sim 20^\circ$ 、 $20\sim 25^\circ$ 、 $25\sim 30^\circ$ 、 $\geq 30^\circ$) 探讨坡度与多源 DEM 均方根误差 RMSE 的关系。

4 结果与讨论

4.1 LiDAR DEM 验证多源 DEM

经过粗差剔除与去除空白值,ICESat-2 ATL06 与 LiDAR DEM 相交数据点共 680 个,其他 DEM 与 LiDAR DEM 相交数据点大于 10 000 个。图 4A-E 是多源 DEM 与 LiDAR DEM 的散点线性回归图、高程差分布直方图。ICESat-2 ATL06 与提取的原始 LiDAR DEM 数据高度相关,相关系数 R 为 1.000。ALOS DEM (12.5 m) 相关系数分别为 0.999 5、0.999 6, SRTM V3 相关系数为 0.999 1,相关系数最低为 ASTER GDEM,为 0.998 4。图 4 结合表 2 可知:

(1) ICESat-2 ATL06 数据(图 4(a))基本无偏峰,且呈尖峰分布,高差平均值为 -0.045 m,系统误差为 0.045 ± 0.746 m,均方根误差 RMSE 约为 0.747 m。

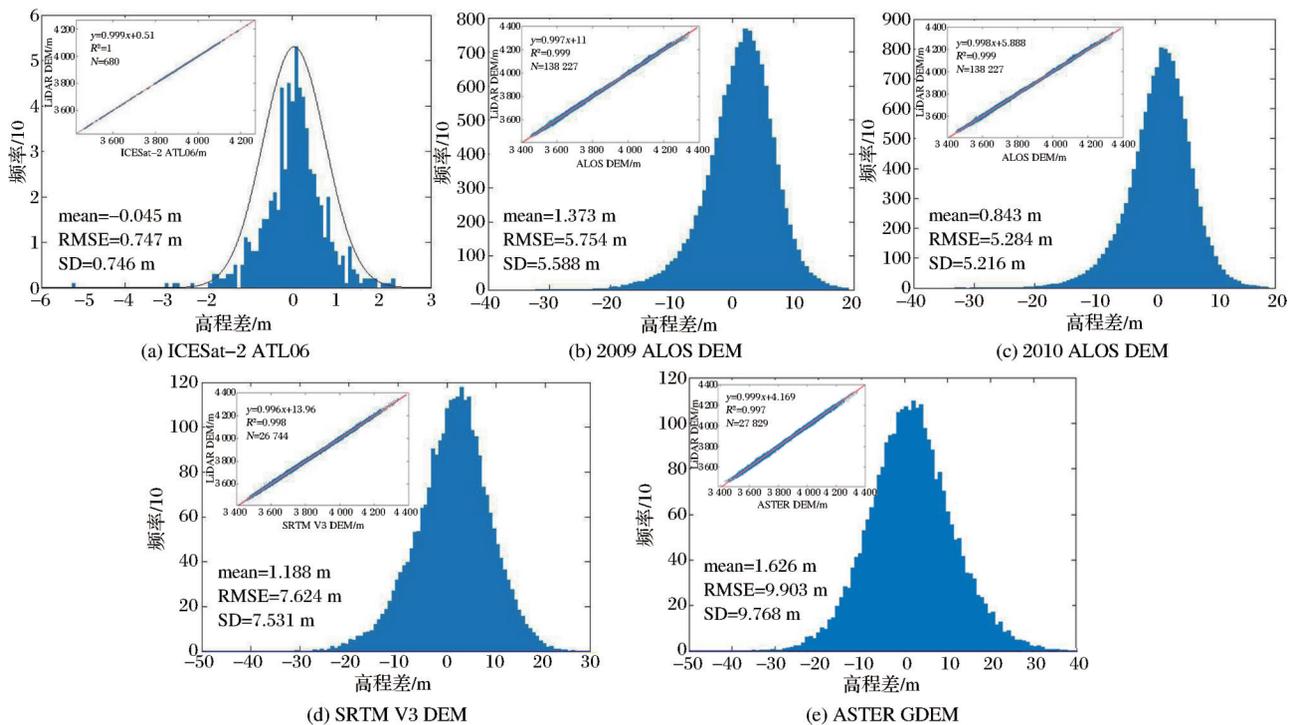


图4 散点图与线性回归图、高差分布直方图(从左至右,从上至下依次为 ICESat-2 ATL06、2009与2010年 ALOS DEM、SRTM V3、ASTER GDEM)

Fig.4 Scatter diagram and linear regression diagram, histogram of elevation difference distribution (From left to right, top to bottom, ICESat-2 ATL06, 2009 and 2010 ALOS DEM, SRTM V3, ASTER GDEM)

表2 多源DEM精度统计表

Table 2 Multi-source DEM accuracy statistical table

	ICESat-2 ATL06/m	2009 ALOS/m	2010 ALOS/m	SRTM V3/m	ASTER GDEM/m
Mean	-0.045	1.373	0.843	1.188	1.626
RMSE	0.747	5.754	5.284	7.624	9.903
SD	0.746	5.588	5.216	7.531	9.768

(2) 2009年与2010年的ALOS数据(图4(b)、4(c))均有轻微的右偏态,高差平均值分别为1.373 m、0.843 m,系统误差分别为 1.373 ± 5.588 m、 0.843 ± 5.216 m, RMSE分别为5.754 m和5.284 m。两期ALOS精度相差不大。激光点云数据采集时间为9月底10月初,与2010年8月获取的ALOS数据环境更相似,而2009年2月份获取的ALOS数据受土壤冻胀等影响,精度相对较差。

(3) SRTM V3数据(图4(d))分布存在右偏态,高差平均值为1.188 m,系统误差为 1.188 ± 7.531 m, RMSE为7.624 m。而ASTER GDEM数据(图4(e))精度最差,可以通过图看到它的高程分布直方图比较低矮,分布较宽,高差平均值为1.626 m,系统误差为 1.626 ± 9.768 m, RMSE为9.903 m。SRTM V3、ASTER GDEM空间分辨率都为30 m。

SRTM V3的精度比ASTER GDEM的精度高,USGS发布的ASTER GDEM垂直精度RMSE为7~14 m^[10],SRTM V3垂直精度RMSE小于10 m^[13]。可见在冰沟流域ASTER GDEM、SRTM V3的垂直精度均达到了官方提供的参考数值。

实验所验证的部分高程产品精度虽然较低,但相关系数均接近于1,主要原因是LiDAR与这些被验证数据同属于高程产品,它们存在同样的变化趋势与相似性,但它们变化的大小用相关系数无法判断。也就是说它们的总体变化趋势是一致的,但是它们之间的方差可能会相差很大。所以会出现相关系数高,而精度较低的现象。

影响这些DEM数据精度的主要因素有卫星传感器、地形坡度、植被、建筑物覆盖等。首先对于卫星传感器,其收集处理数据的方式会对数据精度产生影响。ICESat-2 ATL06精度最高,与其传感器采样方式以及空间分辨率有关。ICESat-2 ATL06传感器采用的方法是垂直向下接收返回的光子,而ALOS DEM虽然空间分辨率比ICESat-2 ATL06高,但是它使用的传感器是侧视雷达,在某些区域会存在较大误差,而且数据是通过NED、SRTMGL1等DEM发展而来,所以在使用该数据时需

要进行验证。

其次又因各DEM的传感器不一样,对冰雪、水体、植被等的穿透能力也不尽相同,也就是同一个地表覆盖类型,传感器不一样,所获得的高程值也不一样。剔除了冰雪与水体区域的点,对这部分地表覆盖产生的穿透误差可以不考虑。而对于植被和建筑物的穿透影响可以从图4中看出,除了ICESat-2 ATL06数据之外,其余数据均存在一定的右偏态。因为SRTM、ASTER、ALOS搭载的传感器测量数据时包含了树冠和建筑物,其记录的电子或电磁波不能完全穿透植被和建筑物到达地面,获得的高程值偏高,会一定程度上影响高程数据的精度。

最后,对于坡度的影响,将多源DEM与LiDAR DEM高程差在 ± 20 m范围外的数据点导出。经过分析,2009与2010年ALOS DEM、SRTM V3、ASTER GDEM坡度大于 20° 的数据点占高程差 ± 20 m范围外数据点总数的51.7%、45.4%、60.5%、69.1%。可以看出,坡度是影响冰沟流域DEM的主要因素,因此,对坡度与RMSE的关系进行了分析(图5)。

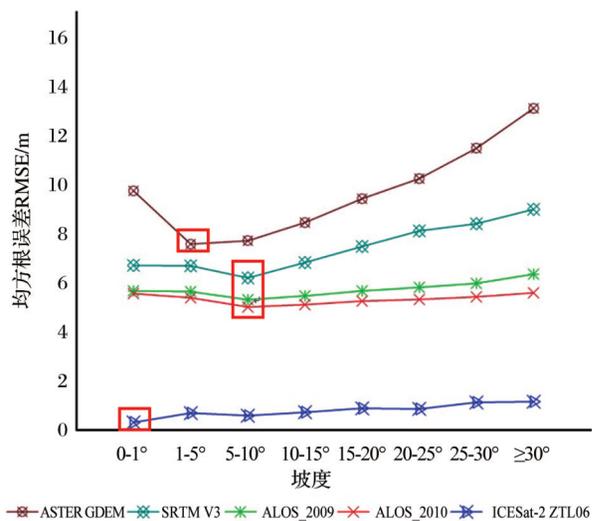


图5 5种高程数据均方根误差随坡度的变化
(红色框代表最佳坡度值)

Fig.5 Root Mean Square Error of five elevation data varies with slope (the red box represents the best slope)

4.2 多源DEM与坡度的关系

冰沟流域地形复杂,坡度是制约DEM精度的主要因素。图5为坡度分级对应的高程差均方根误差RMSE。从图中可以看出,ICESat-2 ATL06在 $1^\circ\sim 5^\circ$ 至 $5^\circ\sim 10^\circ$ 时RMSE随坡度的增加而减小,当坡度大于 10° 时RMSE随坡度的增加而增大。

ALOS DEM、SRTM V3、ASTER GDEM数据的RMSE均随坡度的增加先减小再增大,但是ASTER GDEM的RMSE增大的临界值在 $1^\circ\sim 5^\circ$ 。而ALOS DEM、SRTM V3的RMSE增大的临界值在 $5^\circ\sim 10^\circ$ 。ICESat-2 ATL06 RMSE随坡度的变化很小,ASTER GDEM的RMSE随坡度的变化很大,在 $1^\circ\sim 5^\circ$ 时误差最小。它们都存在一个最佳坡度值。万杰等^[26]利用ICESat数据对整个青藏高原获取的SRTM DEM进行精度评估,表明随坡度的增大精度显著降低。吴宇鑫等^[12]将中国划分为3个区对SRTM进行验证,其中地形复杂区的均方根误差随坡度的变化趋势与本实验一致。赵尚民等^[14]验证山西省中部SRTM与ASTER GDEM均方根误差随坡度的变化, RMSE一直呈现增加的趋势。而实验中RMSE随坡度先减小再增大,出现这种区别最大的原因是研究区地形复杂性与地表覆盖类型的不同。

4.3 多源遥感高程数据适用性讨论

多源遥感高程数据来源于摄影测量、雷达、光探测和测距^[27],来源不同数据优缺点也不同。本实验获取的ICESat-2 ATL06数据是由光子计数产生的激光点,点密度高于ICESat^[16]。从得到的验证结果可以看出ICESat-2 ATL06数据精度高,与LiDAR DEM高度相关,但是由于光子的不稳定,在某些地区激光点并不连续。ICESat-2 ATL06数据的传感器只发射1 064 nm波长,可穿透水体10 m左右(根据水质而定),可以考虑用其进行水深测量^[28],由于几乎无法穿透冰雪层,可用于陆地冰变化研究^[16]。

ALOS数据可以消除一部分的后向散射误差,且纠正了数据的几何畸变,但是数据观测方式是侧视雷达,一些区域会存在阴影效应(<https://asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/alos-palsar-rtc/alos-palsar-radiometric-terrain-correction/>)。实验通过生成阴影图,并未发现空洞与阴影。ALOS 12.5 m的数据由于获取不易,对其的研究较少,目前这种高分辨率的数据可用于提取河道^[29]、地质构造^[30]等研究中。由于ALOS搭载的传感器可以穿透云层,幅宽比普通的SAR宽,可以考虑用于寒区冰冻圈研究,尤其在土壤冻胀融沉方面。针对高寒山区,ICESat-2 ATL06与ALOS数据比较新,后续可以结合一些高分辨率或长时间观测的DEM数据(比如TanDEM-X、ICESat)在冰川消融、冻土变化

等方面进行探讨。

SRTM V3与ASTER GDEM数据的优势在于是覆盖全球范围较广的30 m高程数据,但是SRTM易受到雷达后向散射的影响^[31],ASTER GDEM受地形因素与试验样区的局限性较大^[11]。从实验得到的结果来看,SRTM与ASTER DEM的精度相对较差,除了已经考虑的误差因素外,最大的影响因素是研究区地形的复杂程度,分辨率越低受地形因素影响越大。常用的1弧秒SRTM V3数据早期空洞主要分布在阴影效应地区和存在水体的区域(湖泊与河流),因此SRTM V3数据在高山、峡谷、水域等地数据质量不高,在冰雪覆盖地区以及植被覆盖较低的地区具有一定的穿透能力。所以,SRTM数据可用于寒区冰川冻土研究^[32],但很少用于流域水文研究。ASTER GDEM数据由于是立体相对成像,其精度易受地表建筑物与云层的影响^[31],但其覆盖范围广,适用于重力模型研究^[33]以及结合其它多源高程数据生产高质量的DEM数据^[34],尤其是在数据不易获取的高寒山区,生产高质量的DEM数据显得尤为重要。

综上所述,多源遥感高程数据各有特色,在研究中需根据数据获取难易程度、数据收集时间以及数据的准确性、研究区域大小等方面选择合适的DEM数据。

5 结 论

实验在高寒山区典型区域—青藏高原东北缘冰沟流域,将机载激光点云数据利用多种方法进行插值,使用最佳插值法获得的LiDAR DEM数据作为参考高程,验证遥感高程数据ICESat-2 ATL06、ALOS DEM、SRTM V3、ASTER GDEM,并分析这些数据在不同坡度等级下的高程精度状况。

研究结果表明:①激光点云数据生成栅格时选择最近邻插值方法精度最高,各插值方法验证ICESat-2时RMSE变幅仅为0.022 m,总体来看精度差别不大。②ICESat-2 ATL06与LiDAR DEM数据具有高度相关性,且精度最高。ICESat-2 ATL06与LiDAR DEM系统误差为 0.045 ± 0.746 m, RMSE为0.747 m。ALOS DEM高程精度为5.284 m,精度最差的是ASTER GDEM, RMSE为9.903 m。③坡度是影响冰沟流域高程误差的主要因素,ICESat-2 ATL06均方根误差随坡度的变化幅度不大,随坡度的增大呈现先增大后减小再增大的趋势;其

他多源DEM数据RMSE均随着坡度的增加呈现先减小再增大的趋势。总体来看,新获取的ICESat-2 ATL06、ALOS 12.5 m DEM数据在代表性的高海拔山区精度较高,推荐用于高寒山区冰川、水文、冻土等研究中。SRTM V3、ASTER GDEM虽然是新版本数据,但误差相对较大。

实验对每个高程数据的处理方式与适用情况进行了详细分析,为相关研究的数据选择提供了参考。通过该项工作,进一步确认了以ICESat-2为代表的高精度激光测高数据可以作为资料稀缺地区的高程参考数据。全球与局部尺度的DEM数据在精度和空间分辨率上的差距逐渐缩小,获取高分辨率、高精度且空间基准一致的全球无缝DEM数据逐渐成为可能。但是,如何综合多源遥感高程数据,针对高寒山区地形特征发展地表覆盖完整且精度较高的DEM数据是一大机遇与挑战。

参考文献(References):

- [1] Farr T G, Rosen P A, Caro E, *et al.* The shuttle radar topography mission [J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45 (2) : 1-33.
- [2] Mudd S M. Topographic data from satellites [J]. *Developments in Earth Surface Processes*, 2020, 23:91-128.
- [3] NASA JPL. NASA shuttle radar topography mission global 1 arc second [DB/OL]. 2013, Distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, DOI: org/10.5067/MEASURES/SRTM/SRTMGL1.003. Accessed 2020-02-21.
- [4] NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems, U.S./Japan ASTER Science Team. ASTER Global digital elevation model V003 [DB/OL]. DOI: org/10.5067/ASTER/ASTGTM.003, 2019, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, Accessed 2020-07-5.
- [5] ASF DAAC. ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_low_res; Includes Material © JAXA/METI 2007 [DB/OL]. Accessed through ASF DAAC 11 November 2015, DOI: org/10.5067/JBYK3J6HFSVF.
- [6] Tadono T, Ishida H, Oda F, *et al.* Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM [J]. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2014: 2-4. DOI: 10.5194/isprsannals-II-4-71-2014.
- [7] ADIV, BAAS. TanDEM-X DEM: Comparative performance review employing LiDAR data and DSMs [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 160: 33-50. DOI: org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.015.
- [8] Phan V H, Lindenbergh R, Menenti M. ICESat derived elevation changes of Tibetan lakes between 2003 and 2009 [J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2012, 17: 12-22.

- [9] Satge F, Denezine M, Pillco R, *et al.* Absolute and relative height-pixel accuracy of SRTM-GL1 over the South American Andean Plateau [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 121: 157-166.
- [10] National A, Space A. ASTER GDEM dataset in Heihe River Basin(2009)[DB/OL]. National Tibetan Plateau Data Center, 2013.[National A, Space A. 黑河流域 ASTER GDEM 数据集(2009)[DB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, 2013.]
- [11] Guo Xiaoyi, Zhang Hongyan, Zhang Zhengxiang, *et al.* Comparative analysis of the quality and accuracy between ASTER-GDEM and SRTM3 [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(3):334-339.[郭笑怡, 张洪岩, 张正祥, 等. ASTER-GDEM 与 SRTM3 数据质量精度对比分析 [J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(3):334-339.]
- [12] Wu Yuxin, Zhao Mudan, Gao Zhiyuan, *et al.* Comparison analysis of accuracy of SRTMGL1 and SRTM V4 in Three Typical Regions of China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(4):36-42.[吴宇鑫, 赵牡丹, 高志远, 等. 中国3类典型区 SRTMGL1 和 SRTM V4 精度对比分析 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26(4):36-42.]
- [13] Zhang K, Gann D, Ross M, *et al.* Accuracy assessment of ASTER, SRTM, ALOS, and TDX DEMs for Hispaniola and implications for mapping vulnerability to coastal flooding [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 225:290-306.
- [14] Zhao Shangmin, Cheng Weiming, Jiang Jingtian, *et al.* Error comparison among the DEM datasets made from ZY-3 satellite and the global open datasets[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2020, 22(3):370-378.[赵尚民, 程维明, 蒋经天, 等. 资源三号卫星 DEM 数据与全球开放 DEM 数据的误差对比 [J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(3):370-378.]
- [15] Claudia, C, Carabajal. ICESat validation of SRTM C-band digital elevation models [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(22):023957. DOI:org/10.1029/2005GL023957.
- [16] Neumann T A, Martino A J, Markus T, *et al.* The ice, cloud, and Land Elevation Satellite - 2 Mission: a global geolocated photon product derived from the advanced topographic laser altimeter system [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019:233. DOI:org/10.1016/j.rse.2019.111325.
- [17] Zhang G, Chen W, Xie H. Tibetan Plateau's lake level and volume changes from NASA's ICESat/ICESat-2 and Landsat missions [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(22):085032. DOI:org/10.1029/2019GL085032.
- [18] Narine L L, Popescu S, Neuenschwander A, *et al.* Estimating aboveground biomass and forest canopy cover with simulated ICESat-2 data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 224: 1-11.
- [19] Wang C, Zhu X, Nie S, *et al.* Ground elevation accuracy verification of ICESat-2 data: a case study in Alaska, USA [J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38168-38179.
- [20] Xu Chunhai, Li Zhongqin, Wang Feiteng, *et al.* Estimation of mass balance of Shiyi Glacier in the Heihe River Basin, Qilian mountains during 2000-2012 based on LiDAR and SRTM [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(1):88-100.[徐春海, 李忠勤, 王飞腾, 等. 基于 LiDAR、SRTM DEM 的祁连山黑河流域十一冰川 2000—2012 年物质平衡估算 [J]. *自然资源学报*, 2017, 32(1):88-100.]
- [21] Li Hongyi, Wang Jian, Bai Yunjie, *et al.* The Snow hydrological processes during a representative snow cover period in Binggou Watershed in the upper reaches of Heihe River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(2):293-300.[李弘毅, 王建, 白云洁, 等. 黑河上游冰沟流域典型积雪期水文情势 [J]. *冰川冻土*, 2009, 31(2):293-300.]
- [22] Li Xin, Liu Shaomin, Ma Mingguo, *et al.* Overall design of the combined remote sensing test for ecological and hydrological processes in Heihe River Basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(5):481-498.[李新, 刘绍民, 马明国, 等. 黑河流域生态—水文过程综合遥感观测联合试验总体设计 [J]. *地球科学进展*, 2012, 27(5):481-498.]
- [23] Brunt K M, Neumann T A, Smith B E. Assessment of ICESat-2 Ice sheet surface heights, based on comparisons over the interior of the antarctic ice sheet [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(22):13072-13078.
- [24] Nuth C, Kaab A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change [J]. *Cryosphere*, 2011, 5(1):271-290.
- [25] Wan Jie, Liao JingJuan, Xu Tao, *et al.* Accuracy evaluation of SRTM data based on ICESat/GLAS altimeter data: a case study in the Tibetan Plateau [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2015, 27(1):100-105.[万杰, 廖静娟, 许涛, 等. 基于 ICESat/GLAS 高度计数据的 SRTM 数据精度评估——以青藏高原地区为例 [J]. *国土资源遥感*, 2015, 27(1):100-105.]
- [26] Rabah M, El-Hattab A, Abdallah M. Assessment of the most recent satellite based digital elevation models of Egypt [J]. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2017: S2090997717301190. DOI:org/10.1016/j.nrjag.2017.10.006.
- [27] Smitha B A, Fricker H, Holschuh N, *et al.* Land ice height-retrieval algorithm for NASA's ICESat-2 photon-counting laser altimeter [J]. *Remote Sensing of Environment*, 233. DOI:org/10.1016/j.rse.2019.111352.
- [28] Brêda J P L F, Paiva R C D, Bravo J M, *et al.* Assimilation of satellite altimetry data for effective river bathymetry [J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(9). DOI:org/10.1029/2018WR024010.
- [29] Monteiro K D A, Antonio carlos de Barros corrêa. application of morphometric techniques for the delimitation of Borborema Highlands, northeast of Brazil, eastern escarpment from drainage knick-points [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2020, 103:102729.
- [30] Colavitto B, Sagripanti L, Jagoe L, *et al.* Quaternary tectonics in the southern Central Andes (37-38° S): Retroarc compression inferred from morphotectonics and numerical models [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2020, 102:102697.
- [31] Wu Wenjiao, Zhang Shifang, Zhao Shangmin. Analysis and

- comparison of SRTM1 DEM and ASTER GDEM V2 Data [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(8):1108-1115.[武文娇, 章诗芳, 赵尚民. SRTM1 DEM与ASTER GDEM V2数据的对比分析[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(8):1108-1115.]
- [32] Zhongqiong Z, Qingbai W, Xueyi X, *et al.* Spatial distribution and changes of Xing'an permafrost in China over the past three decades[J]. *Quaternary International*, 2019, 523:16-24.
- [33] Zhang G, Shen W, Zhu Y, *et al.* Evaluation of ASTER GDEM in the northeastern margin of Tibetan Plateau in gravity reduction[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2017, 8(5):335-341.
- [34] Yue L, Shen H, Zhang L, *et al.* High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 123:20-34.

Accuracy Evaluation of Remote Sensing Elevation Data in Alpine Mountains based on Airborne LiDAR

Zhang Huan^{1,2}, Li Hongyi¹, Li Haojie^{1,2}, Che Tao^{1,3}

(1. *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

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

3. *Chinese Academy of Sciences Heihe Remote Sensing Station, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: Remote sensing is an essential means to obtain DEM data in areas lacking information. However, due to the scarcity of field elevation measurements in alpine mountains, it is difficult to verify multi-source remote sensing DEM data uniformly. New remote sensing elevation data such as ICESAT-2 also lack the corresponding accuracy evaluation in alpine mountainous areas. To solve this problem, we take the Binggou Basin on the northeast margin of the Tibetan plateau as the research area. Applying the wide range of LiDAR DEM data acquired by airborne remote sensing to the new product ICESAT-2 ATL06, ALOS DEM 12.5 m, the new version of SRTM V3 and ASTER GDEM were verified, and the relationship between terrain factor and RMSE was analyzed. The results show that ICESat-2 ATL06 can reach 0.747 m in RMSE in alpine mountains. Because of its high precision, it can be used to verify other remote sensing elevation in the data shortage area. The accuracy of other remote sensing elevation is relatively low. The RMSE of ALOS 12.5 m data is 5.284 m. RMSE of ASTER GDEM V3 version is 9.903 m. The five kinds of remote sensing elevation data used in this study have a high correlation with airborne LiDAR DEM, with the correlation coefficient between 0.997 and 1.000. Our study also reveals that slope is the main factor affecting the accuracy of remote sensing DEM. Except ICESat-2 ATL06, RMSE of other elevation data decreases first and then increases with the increase of slope, and there is an optimal slope value for all of them. In view of the typical characteristics of the alpine mountains on the Tibetan plateau, the verification conclusions of multi-source remote sensing DEM data in this region are representative, which can provide an important knowledge supplement for the application and evaluation of laser remote sensing DEM data in similar areas.

Key words: Remote sensing elevation measurement; ICESat-2; LiDAR; DEM; Alpine region