

# 中国 5 类典型区域常用 DEM 高程精度评价

蒋广鑫<sup>1,2</sup>, 谢元礼<sup>1,2,3</sup>, 高志远<sup>1</sup>, 周 鹏<sup>1</sup>

(1.西北大学 城市与环境学院, 西安 710127; 2.陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127; 3.西北大学 地表系统与灾害研究院, 西安 710127)

**摘 要:**探究常用的 3 种 DEM 在中国不同地貌区的误差分布特征,为 3 种 DEM 在不同研究区的应用提供支撑。选取中国 5 类典型区(华北平原、黄土高原、青藏高原、塔里木盆地和云贵高原)为研究区域,以 ICESat/GLAS GLAH14 点数据为参考高程,选取目前最常用的 3 种 DEM 数据,SRTM 1 Arc-Second Global(SRTMGL1),SRTM Version 4 (SRTM V4),ASTER GDEM V2(ASTER V2)作为精度评价数据,结合地形要素和地表覆盖,对 3 种 DEM 在 5 类研究区域的高程精度进行了对比分析。结果表明:(1)在 5 类研究区中,总体上 SRTMGL1 数据精度优于 SRTM V4 和 ASTER V2,其中以塔里木盆地 3 种 DEM 精度最高,云贵高原精度最低。(2)不同坡度区间内,SRTMGL1 的数据精度皆高于 ASTER V2 和 SRTM V4,平原地区( $<10^\circ$ ),SRTM 两类 DEM 精度相近,可互为补充,高植被覆盖、大坡度区域,SRTMGL1 数据精度一般为最优,ASTER V2 精度优于 SRTM V4。(3)坡向对于 3 种 DEM 的影响较小,误差分布较均匀。(4)3 种 DEM 在耕地和人造表面覆盖区域的精度最高,在林地覆盖区域,DEM 精度最低。(5)不同地貌对 3 种 DEM 的精度具有较大的影响。SRTMGL1 精度最优且受地形和地表覆盖影响最小,其次,SRTM V4 在平原地区精度较好,受地形影响最大,ASTER V2 在植被覆盖的地貌复杂区域精度较好,两者互有优劣。

**关键词:**精度评价; ICESat/GLASGLAH14; 高程误差; SRTMDEM; ASTERV2; 地形因子; 地表覆盖

中图分类号:P208

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0072-09

## Evaluation on Elevation Accuracy of Commonly Used DEM in Five Typical Areas of China

JIANG Guangxin<sup>1,2</sup>, XIE Yuanli<sup>1,2,3</sup>, GAO Zhiyuan<sup>1</sup>, ZHOU Peng<sup>1</sup>

(1.College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2.Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University,

Xi'an 710127, China; 3.Institute of Earth Surface System and Hazards, Northwest University, Xi'an 710127, China)

**Abstract:** This study explored the error distribution characteristics of 3 commonly used DEMs in different landform areas in China to support for application of 3 DEMs in different research area. This study selected 5 typical regions of China (North China Plain, Loess Plateau, Qinghai-Tibet Plateau, Tarim Basin and Yunnan-Guizhou Plateau) as research areas, with ICESat/GLAS GLAH14 points data as the reference elevation, and 3 most commonly used DEM data, SRTM 1 Arc-Second Global(SRTMGL1), SRTM Version 4(SRTM V4), ASTER GDEM V2(ASTER V2) were selected as the accuracy evaluation data. Combined with terrain factors and land coverage, a comparative analysis about the elevation accuracy of the 3 DEMs in the 5 types of research areas was made. The results show that: (1) in the 5 types of research areas, the SRTMGL1 data accuracy is better than SRTM V4 and ASTER V2 in general, among which the 3 kinds of DEM in the Tarim Basin have the highest precision and that in the Yunnan-Guizhou plateau has the lowest precision; (2) the data accuracy of SRTMGL1 is higher than that of ASTER V2 and SRTM V4 in different slopes; the plain area ( $<10^\circ$ ), two types of SRTM DEM have similar precision, which can complement each other; in high vegetation coverage and large slope area, SRTMGL1's data accuracy is generally optimal, ASTER V2's

收稿日期:2019-10-25

修回日期:2019-12-25

资助项目:中国科学院“一带一路”科技合作专项“中国科学院国际合作局对外合作重点项目”(131C11KYSB20160061);中国科学院 A 类战略性先导科技专项“地球大数据科学工程”(XDA19070302)

第一作者:蒋广鑫(1995—),男,江苏省泰州市人,硕士研究生,主要研究地理信息科学。E-mail:1364282438@qq.com

通信作者:谢元礼(1968—),男,湖南衡阳人,副教授,主要研究自然地理学和测绘学。E-mail:37911220@qq.com

accuracy is close to SRTMGL1's, and SRTM V4 is the most affected by slope and has the lowest accuracy; (3) the aspect has little effect on the 3 types of DEM and can be ignored; (4) the 3 types of DEM have the highest precision in the area covered by cultivated land and artificial surface, and the DEMs have the lowest precision in the forest coverage area; (5) different geomorphological divisions have the greater impact on the accuracy of the 3 DEMs. SRTMGL1 has the best accuracy and is least affected by terrain and surface coverage. Secondly, SRTM V4 has better accuracy in the plain area and is most affected by the terrain, ASTER V2 has better accuracy in the area with complex landforms and covered by vegetation, and both have their own advantages and disadvantages.

**Keywords:** accuracy evaluation; ICESat/GLAS GLAH14; elevation error; SRTM DEM; ASTER V2; terrain factors; land coverage

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)作为地表高程信息的数据源,对于水土流失以及地形因子提取等地学研究具有关键性作用。作为地学研究中广泛应用的基础数据之一,其精度的优劣直接关系到科研结果的可信度及科学性。现阶段,针对 DEM 精度评价的方法主要有 2 种:(1) 利用更高精度的地面测量控制点对 DEM 数据进行对比分析,如 GPS 实测点数据<sup>[1-3]</sup>和高程控制点数据<sup>[4-5]</sup>;(2) 利用更高精度的 DEM 数据与之进行对比,获得精度评价,例如最常用的方法,通过与大比例尺地形图生成的 DEM 对数据进行分析评价<sup>[6-8]</sup>。然而当研究范围是大区域时,将会面临以下问题:第一,无法大范围地获取地面测量数据。第二,由于研究区域的范围较广以及数据的保密性,无法获取更高的 DEM 数据来评价已有数据。基于此,目前已有不少学者以 ICESAT/GLAS 高程数据作为地面参考点数据对大尺度区域 DEM 进行精度分析。胡加佩等<sup>[9]</sup>利用 GLAH14 数据对全国范围的 SRTM V4 和 ASTER GDEM 数据进行了对比,系统分析了两种 DEM 的误差统计特征和空间分布特征,结果表明,两种 DEM 都与地形有着较强的相关性。武文娇等<sup>[10]</sup>以山西省为研究区,基于 ICESat/GLAS GLAH14 测高数据对 SRTMGL1 和 ASTER GDEM V2 数据的垂直精度进行了对比,结合地形因子以及利用地形剖面分析的方法分析了数据差异。结果表明了 SRTM1 DEM 垂直精度高于 ASTER GDEM V2,并且两种数据均受坡度影响严重,土地利用类型和地貌类型影响较小。

目前的 DEM 精度评价研究多是针对某一类 DEM 精度的讨论,或两类 DEM 之间的对比,研究目的更多的是突出说明某种 DEM 数据的整体优越性。常见评价的 DEM 种类主要集中在 ASTER GDEM V2, SRTMGL1 和 SRTM V4 等 3 类高程数据,且研究范围上,以全国范围或者局部小范围区域为主,缺乏对典型区域精度的研究。基于此,本文的研究目的

是通过探究常用 DEM 在不同区域的精度表现,以便为之后的地学研究数据选取提供一定的指导作用,因此本文选取这 3 种 DEM 在 5 类地貌典型区进行对比研究。

本文以 ICESAT/GLAS GLAH14 点数据为参照,以地貌为特征,选取中国 5 类典型区域作为研究区域,对 SRTMGL1, SRTM V4, ASTER V2 数据的质量进行量化分析,以便于了解 3 种高程产品在不同研究区的误差分布特征,为数据选用及误差修正提供依据。

## 1 试验区与数据

### 1.1 研究区概况

本文依据研究区内地貌类型构成的不同,选择中国的 5 类典型地貌区:华北平原、黄土高原、青藏高原、云贵高原和塔里木盆地。其中华北平原区域地貌主要由平原区和低山丘陵区组成;黄土高原其间沟壑纵横,由山地区、黄土丘陵区、黄土塬区、黄土台塬区、河谷平原区组成,是地貌研究的热点区域;青藏高原主要由高原山区和高原平原组成,平均海拔超过了 5 000 m;塔里木盆地处于中国新疆南部,是中国面积最大的内陆盆地,中间盆地,边缘砾石沙漠;云贵高原作为中国四大高原之一,区域内大部分为山区地形,是世界上喀斯特地貌最发育的典型地区之一。这 5 个区域都属于地貌研究热点区域,具有较高的研究价值和地貌代表性。

### 1.2 研究数据

本文研究数据分为:

(1) 分析数据,包括 SRTMGL1, SRTM V4 和 ASTER GDEM。其中, SRTMGL1 即 SRTM 1 Arc-Second Global 数据,对应的平面分辨率精度为 30 m,数据下载网址为 <http://earthexplorer.usgs.gov/>。SRTM V4 采用的是 90 m 分辨率 SRTM V4.1 版本数据,来源于(<http://srtm.csi.cgiar.org/>); ASTER GDEM 选择版本为 ASTERV2,来源于(<http://www.gscloud>。

cn/), 平面分辨率为 30 m, 是由对地观测卫星 Terra 的近红外波段垂直向下和后视两个传感器获取的立体像对生成的 DEM 数据。

(2) 参考数据, 包括 ICESAT/GLAS 数据和中国地貌类型数据。ICESAT/GLAS 数据为 2003—2009 年观测并经处理后的全球(南北纬 86°之间)地球表面的高程散点数据, 具有覆盖范围广、精度高的特点。本文采用的是 GLAH14 数据, 来源于美国国家冰雪数据中心(<http://nsidc.org/data>)。中国地貌类型数据包括 2005 年中国土地利用现状遥感监测数据和中国 100 万地貌类型空间分布数据。2005 年中国土地利用现状遥感监测数据是以各期 Landsat TM/ETM 遥感影像为主要数据源, 通过人工目视解译生成, 空间分辨率为 1 km, 数据来源为中国科学院资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/>)。中国 100 万地貌类型空间分布数据来源于《中华人民共和国地貌图集(1:100 万)》, 数据来源为中国科学院资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/>)。

### 1.3 数据预处理

(1) 格式统一。SRTMGL1, SRTM V4, ASTER GDEM V2 均为 TIF 格式的栅格数据, GLA14 为二进制点云数据, 利用 HDFVier 工具, 从 GLA14 原始二进制文件中读取测高数据, 并将其转换成 shape 文件<sup>[11]</sup>。

(2) 基准统一。在高程基准方面, 可以利用式(1)将 GLAH14 的高程统一到 WGS84 参考椭球高程下。

$$H_{\text{WGS84}} = h - N - \text{offset} \quad (1)$$

式中:  $h$  是激光光斑中心相对于  $T/P$  椭球的高程;  $N$  是 EGM96 水准面与  $T/P$  椭球面的差值;  $\text{offset}$  是两个椭球体高程差异;  $\text{offset}$  一般取值为 0.7 m;  $h$ ,  $N$  使用 HDFVier 工具直接提取。

(3) GLA14 点云筛选。由于 ICESAT 数据存在粗差, 因此, 基于 ICESAT 数据对 SRTM, ASTER GDEM 等 DEM 精度进行评估时, 需要对 ICESAT 点云数据进行筛选。通过对已有的研究成果分析并结合本文研究区的地形特征, ICESAT 数据粗差剔除原则<sup>[9]</sup>为: ICESAT 数据中, 云顶端的回波信号可导致 GLA14 数据含有超过  $\pm 100$  m 左右的粗差, 考虑到 SRTM 数据精度优于 ASTER 数据, 故通过计算对应位置上 SRTM DEM 和 ICESat/GLAS 差值, 剔除差值在  $\pm 100$  m 以外的 ICESat 点<sup>[12-13]</sup>。

(4) 点数据地类属性提取。在 GLA14 点云筛选结果的基础上, 采用双线性内插的方法获取对应位置的属性值。

## 2 数据精度分析方法

研究中精度指标选取了高程误差  $d$ , 平均误差 Mean, 标准偏差 SD 和中误差 RSME 作为精度评价指标。

$$d = h_{\text{DEM}} - h_{\text{ICESat/GLAH14}} \quad (2)$$

$$\text{Mean} = \frac{\sum d}{n} \quad (3)$$

$$\text{SD} = \sqrt{\frac{\sum (d - \text{Mean})^2}{n}} \quad (4)$$

$$\text{RSME} = \sqrt{\frac{\sum d^2}{n}} \quad (5)$$

式中: 利用高程误差  $d$  表示每个实际点位 DEM 与 ICESat/GLAS GLAH14 数据之间的差值; 利用平均误差 Mean 表示 DEM 数据集相较于 ICESat/GLAS GLAH14 数据集的数据整体精度。标准差 SD 则代表了高程误差间的离散程度。中误差 RSME 则代表了测量值与真值的偏离程度, 也是评价数据精度的最直接标准。

利用以上几种精度评价指标, 首先对 3 种 DEM 在不同典型区域的总体精度进行统计, 然后, 结合坡度、坡向、土地覆盖、地貌因素等进行 3 种 DEM 精度的分析。坡度因子分析中, 将所有典型区域坡度进行统一的离散化分级, 级差划分为  $0^\circ \sim 1^\circ$ ,  $1^\circ \sim 5^\circ$ ,  $5^\circ \sim 10^\circ$ ,  $10^\circ \sim 15^\circ$ ,  $15^\circ \sim 20^\circ$ ,  $20^\circ \sim 25^\circ$ ,  $25^\circ \sim 30^\circ$ ,  $30^\circ \sim 35^\circ$ ,  $35^\circ \sim 40^\circ$ , 以及  $> 40^\circ$ , 分别计算每个坡度分级里不同 DEM 精度表现。坡向因子方面, 将坡向以  $45^\circ$  为一个区间分为 8 个坡向区域, 计算每个坡向区间内各个 DEM 的精度表现。土地覆盖和地貌因素方面, 计算各个 DEM 在不同地貌因素和土地覆盖中的 SD 和 RSME, 对 3 种 DEM 进行精度比对分析。

## 3 结果及分析

### 3.1 不同区域的 DEM 精度总体评价

3 种 DEM 在 5 类典型区域的精度评价结果见表 1, 结论如下: (1) 总体上, SRTMGL1 的数据精度明显优于 SRTM V4 和 ASTER V2, SRTMGL1 的平均误差为  $-2.083$  m, 系统误差为  $(2.083 \pm 8.201)$  m, 数据精度为 8.462 m, 离散程度较另外 2 种 DEM 也偏小; ASTER V2 总体精度则略微优于 SRTM V4, ASTER V2 平均精度为 2.540 m, 系统误差为  $(2.540 \pm 16.312)$  m, 数据精度为 16.509 m, SRTM V4 平均精度为 2.208 m, 系统误差为  $(2.208 \pm 17.579)$  m, 数据精度为 17.717 m; (2) 结合试验区, SRTMGL1 在 5 类试验区中精度表现均为最优, 数据精度保持在 10 m 左右, SRTM V4 和 ASTER V2 则在不同的试验区精度表

现各有优劣。华北平原和塔里木盆地两个试验区中, SRTM V4 精度优于 ASTER V2;而在黄土高原, 青藏高原和云贵高原 3 个试验区中, SRTM V4 精度迅速下降, 精度明显低于 ASTER V2, 分析其原因, 极大程度是因为 ASTER GDEM 通过对立体影像对解译获得, 其精度易受云或者地标建筑等影响, 而 SRTM V4 受地形起伏或是植被覆盖度等影响, 因

此, 在平坦区域, SRTM V4 精度优于 ASTER V2, 当地形起伏较大, 如山地地区, ASTER V2 精度优于 SRTM V4。(3) 3 种 DEM 随着试验区的不同, 精度表现均有着不同程度的变化, 华北平原和塔里木盆地, 3 种 DEM 均具有较好的精度, 三者分异性不大, 当试验区为高原地区, 3 种 DEM 则产生了较大差异, 充分说明, 3 种 DEM 与地形有着密切的关系<sup>[14]</sup>。

表 1 SRTMGL1, SRTM V4 和 ASTER V2 精度指标 m

研究区域	DEM 数据	max	min	Mean	SD	RSM
华北平原	SRTM V4	99.792	−97.111	2.056	7.099	7.391
	ASTER V2	99.555	−92	−0.269	9.937	9.940
	SRTMGL1	99.168	−83	2.048	6.881	7.179
黄土高原	SRTM V4	99.902	−99.078	1.000	14.722	14.755
	ASTER V2	99.984	−99.282	1.554	12.722	12.817
	SRTMGL1	99.872	−95.314	1.138	9.944	10.009
青藏高原	SRTM V4	99.997	−99.981	2.405	19.026	19.177
	ASTER V2	99.867	−99.989	2.492	18.204	18.374
	SRTMGL1	99.271	−99.916	2.154	8.105	8.387
塔里木盆地	SRTM V4	98.739	−99.745	2.704	5.706	6.315
	ASTER V2	98.575	−99.938	4.515	10.749	11.659
	SRTMGL1	95.739	−65.826	2.693	3.786	4.647
云贵高原	SRTM V4	99.960	−99.947	1.952	21.857	21.943
	ASTER V2	99.664	−99.405	2.431	17.918	18.082
	SRTMGL1	99.741	−99.303	1.974	12.326	12.483
总计	SRTM V4	99.971	−99.981	2.208	17.579	17.717
	ASTER V2	99.984	−99.989	2.540	16.312	16.509
	SRTMGL1	99.872	−99.916	2.083	8.201	8.462

3.2 坡度对 DEM 精度影响

3 种 DEM 中误差在不同研究区域随坡度分级的变化特征如图 1 所示, 3 种 DEM 在所有区域都保持着随着坡度的增加, 中误差逐渐递增的趋势。在所有的研究区域中, SRTMGL1 的数据精度都要优于 SRTM V4, 在地势较为平坦的地区(坡度<1°), SRTMGL1 和 SRTM V4 中误差较为接近, 其中, 华北平原两种 DEM 中误差之差为 0.02 m, 塔里木盆地两种 DEM 中误差之差为 0.05 m, 黄土高原、青藏高原、云贵高原两类 DEM 中误差之差依次为 0.25 m, 0.4 m, 1.5 m, 精度差异细微, 2 类 DEM 可以互为补充, 在此坡度分级下, 由于成像方式的不同, ASTER V2 与 SRTM DEM 存在着 3~13 m 的中误差之差, 精度较差。随着研究区内坡度增大, 不同研究区内 3 种 DEM 中误差变化规律逐渐不同, SRTMGL1 和 ASTER V2 在各研究区内都保持着相对平稳的中误差之差, 华北平原、黄土高原、青藏高原、塔里木盆地、云贵高原 2 类数据之差依次为 (0.6±4.0) m, (2.8±0.6), (11.4±1.4) m, (7.6±3.8) m, (6.5±3.3) m。分析 DEM 在所有 5 个试验区中精度表现, SRTMGL1 一般保持着最高精度, 但是在华北平原地区, 当坡度>30°时, SRTMGL1 精度迅速下降, ASTER V2 精度

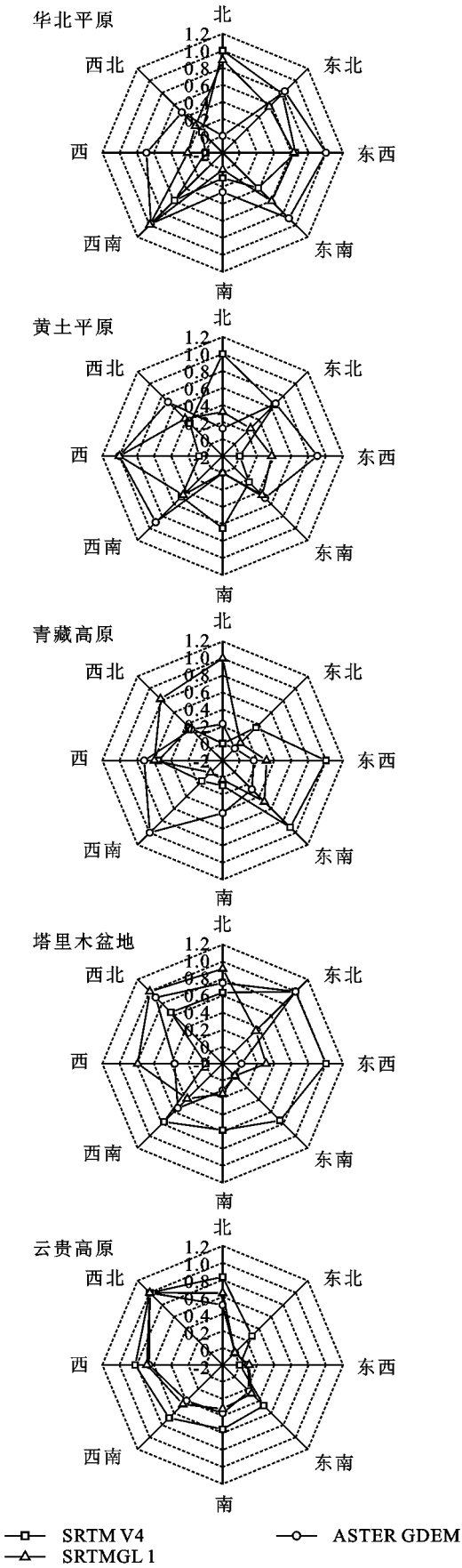
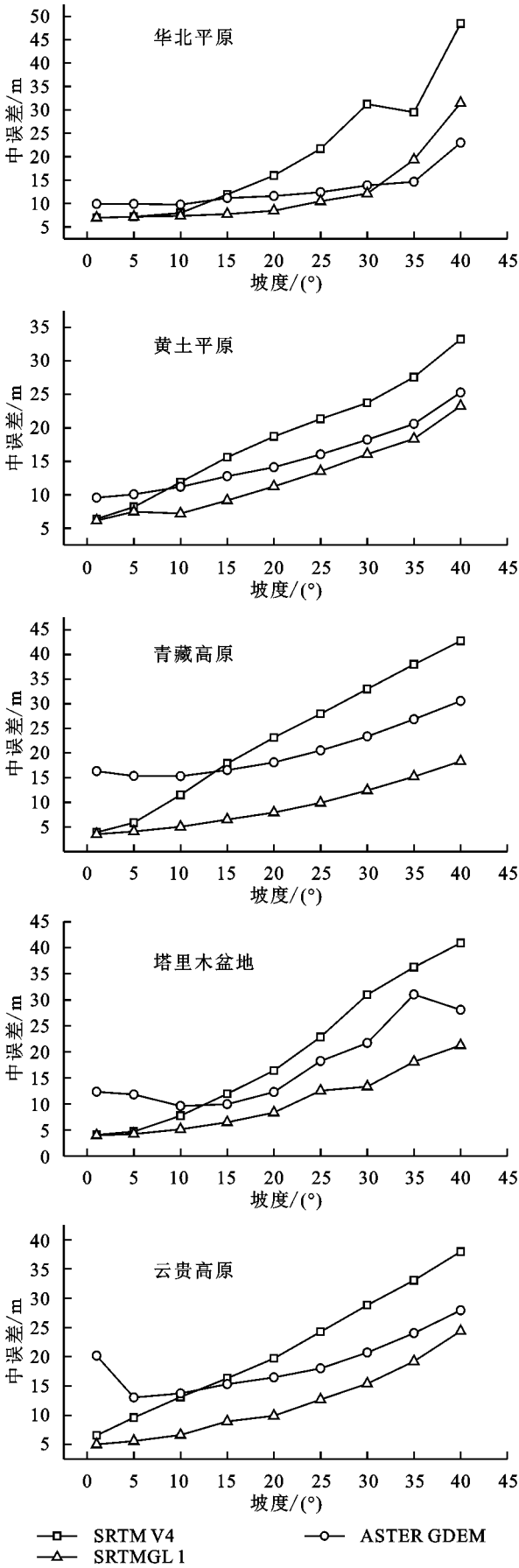
优于 SRTMGL1, 为 3 种数据精度最高。而 SRTM V4 和 ASTER V2 随着坡度分级, 各有优劣: 在坡度较小(<10°)时, SRTM V4 精度优于 ASTER V2, 当坡度>10°, ASTER V2 精度开始优于 SRTM V4, 且 SRTM V4 精度随着坡度的增加, 分异程度明显大于 ASTER V2, 递增速率明显, 精度较差, ASTER V2 则与 SRTMGL1 保持着接近的递增速率, 相对 SRTM V4 而言具有较高的精度<sup>[14]</sup>。

3.3 坡向对 DEM 精度影响

将坡向以 45°为一个区间, 划分为 8 个坡向级, 北方向(337.5°~22.5°)、东北方向(22.5°~67.5°)、东方向(67.5°~112.5°)、东南方向(112.5°~157.5°)、南方向(157.5°~202.5°)、西南方向(202.5°~247.5°)、西方向(247.5°~292.5°)、西北方向(292.5°~337.5°), 参考 Zhang 等<sup>[15]</sup>在研究地表覆盖对 SRTM DEM 精度的影响时控制变量的思想, 为了研究 3 种 DEM 在不同区域的精度表现, 将 3 种 DEM 在 5 类典型区域的各坡向中误差归一化到区间内, 绘制在雷达图上, 以研究 3 种 DEM 在不同区域的精度表现, 结果如图 2 所示。其中, ASTER V2 在 5 个区域的西南坡向上均出现了较大的中误差, SRTM V4 的中误差主要出现在正西, 正东, 正北, 正



南方向。SRTMGL1 则呈现不规律性。



在黄土高原研究区,3 种 DEM 均呈现对称分布。而在地势平坦的华北平原地区,SRTM V4 和 SRT-

MGL1 精度随坡向分异性大致相似,在地势复杂的云贵高原研究区,3 种 DEM 精度分异性大体一致,分析其原因,可能是因为云贵高原的高密度植被覆盖导致 DEM 的精度均有所下降。在地势复杂而地表覆盖不高的青藏高原研究区,3 种 DEM 分别呈现出截然不同的分异性,SRTM V4,ASTER V2 和 SRTMGL1 分别在东南,西南,西北方向精度最低,并明显规律。随坡向的变化,3 种 DEM 表现出高程测量偏离值分异特征,原因可能与卫星传感器在上升轨道和下降轨道的航向以及 SRTM 传感器雷达与地表的入射角度有关。

将每一种 DEM 在不同研究区的随坡向的精度表现绘制雷达图,结果如图 3 所示 3 种 DEM 在华北平原、塔里木盆地、黄土高原和青藏高原 4 个研究区中,随着坡向的变化,每一种 DEM 在 4 个研究区的精度变化程度大体相当,这表明在同一地区,坡向对 DEM 数据精度的影响不大。云贵高原则在东方向,东南方向以及东北方向出现了中误差变小的情况,而 SRTMGL1 和 SRTM V4 两种数据在 5 个研究区内误差分布相似,推测可能与 SRTM 传感器与地表入射角度有关。

3.4 土地利用类型对 DEM 精度影响

基于土地类型对研究区域进行分类,将试验区分为耕地,林地,草地,水域,人造表面,未利用土地等 5 种类型。分别计算每个试验区各土地类型范围内的 3 种 DEM 与 ICESat/GLAS 控制点的中误差,进行统计,绘制柱状图(图 4)以及将每种 DEM 的 5 个试验区随土地类型的变化进行纵向比较,制成折线图(图 5)。

试验结果表明,同一试验区内,随着土地覆盖类型的变化,SRTMGL1 精度均优于 SRTM V4 和 ASTER V2。地势平坦地区(华北平原和塔里木盆地),SRTM V4 和 SRTMGL1 两种 DEM 中误差之差较为接近,除林地类型以外,中误差之差最大值为 2.2 m,最小值仅为 0.01 m,充分说明平坦地区,不同的土地覆盖类型,SRTM V4 与 SRTMGL1 数据精度相当,ASTER V2 精度最低。而在高原地区,SRTM V4 数据集精度略微低于 ASTER V2,且在林地类型区域,SRTM V4 数据偏差均高于 ASTER V2,说明在密度植被覆盖区域,ASTER V2 的精度优于 SRTM V4<sup>[16]</sup>。2 种 DEM 虽然生成原理不同,但均受植被覆盖影响严重,因此林地的精度较低。

在对 3 种 DEM 的横向对比中可以发现,SRTM V4 数据集随土地利用类型的精度变化,由高到低依次为:人造表面,耕地,未利用土地,水域,草地,林地。其中 SRT-

MGL1 与 SRTM V4 保持统一的精度变化趋势,但是 SRTMGL1 数据集整体精度高于 SRTM V4。ASTER V2 的精度随着土地利用覆盖类型的变化,中误差随着人造表面,未利用土地,水域,草地,耕地,林地而依次增大<sup>[17]</sup>。

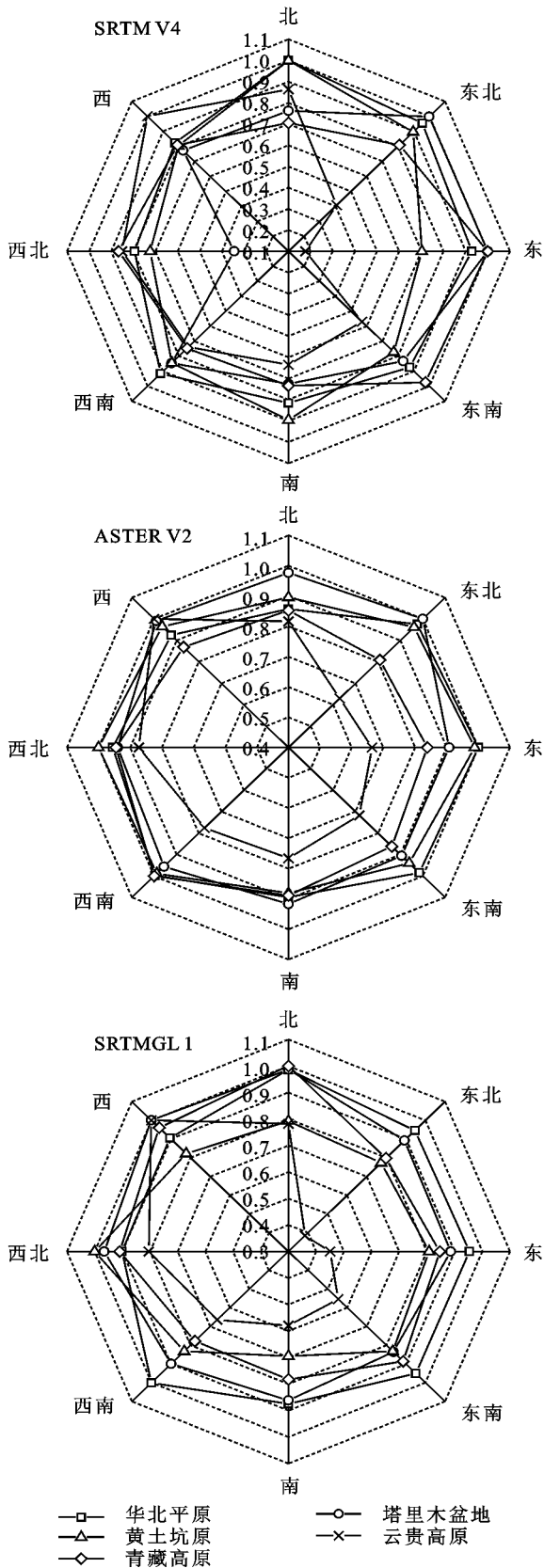


图 3 各 DEM 不同研究区中误差和坡向的关系

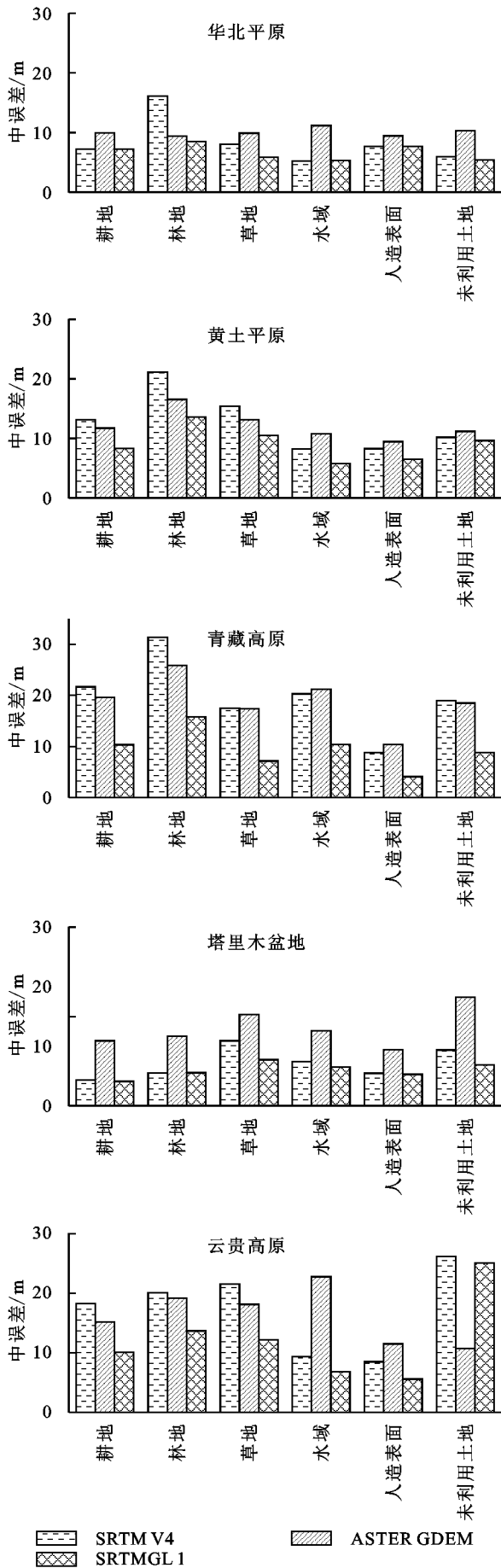


图 4 各研究区 3 种 DEM 中误差和土地利用类型的关系

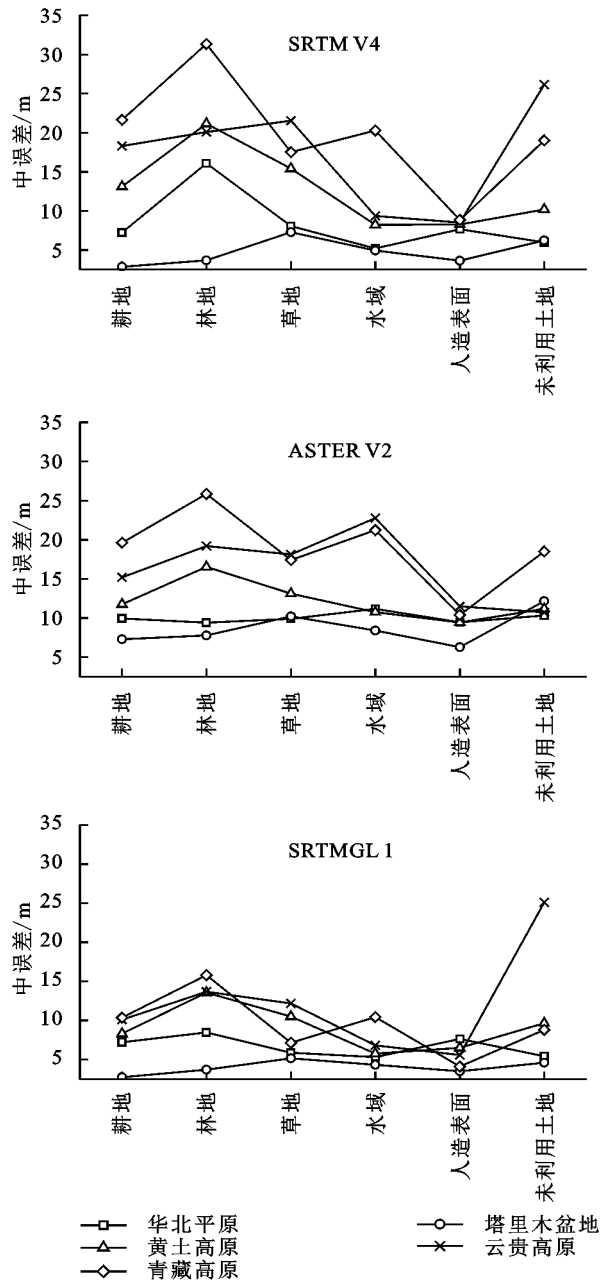


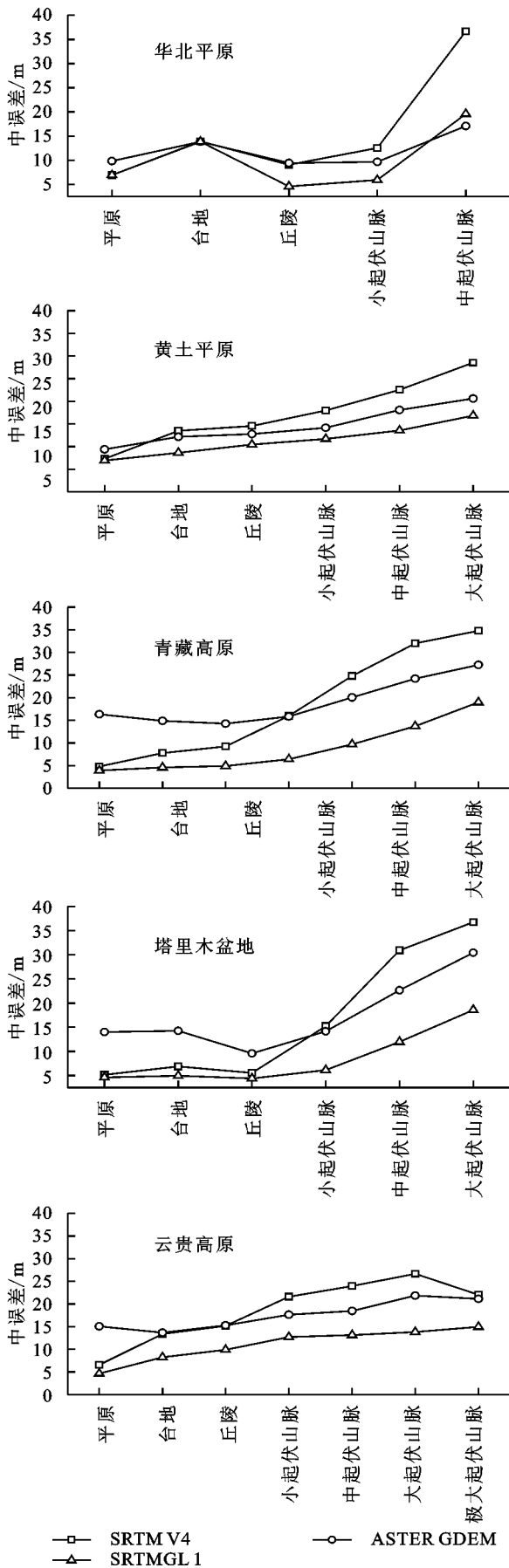
图 5 各 DEM 不同研究区中误差和土地利用类型的关系

### 3.5 地貌类型对 DEM 精度影响

基于地貌类型对 SRTMGL1, SRTM V4, ASTER V2 进行分类,根据中国 100 万地貌类型空间分布数据集分类标准将地貌类型分为平原、台地、丘陵、小起伏山脉、中起伏山脉、大起伏山脉、极大起伏山脉,研究在 5 个试验区内,地貌类型的变化对于 3 种 DEM 的精度影响(图 6 和图 7)。

结果表明,SRTMGL1 在 5 个试验区均为精度最高的数据集,且 ASTER V2 在地貌类型为平原的地区精度是 3 种 DEM 中最低的。5 个试验区中,华北平原、青藏高原、塔里木盆地、云贵高原 4 个试验区中 SRTM V4 在平原、台地、丘陵的精度均高于 ASTER V2。当地貌类型变为山脉,且随着海拔的升高,AS-

TER V2 精度高于 SRTM V4。



总体而言,3种DEM均随着海拔的升高,中误差逐渐递增,其中,SRTM V4随着海拔的升高,中误差递增速率较快,在高原试验区山脉地区中误差升高迅速,精度下降速度较快。SRTMGL1和ASTER V2中误差递增速率则呈现缓慢的递增趋势。3种DEM在5个试验区的台地地貌中精度明显下降,中误差明显高于平原和丘陵地貌,在华北平原试验区较为明显<sup>[18]</sup>。

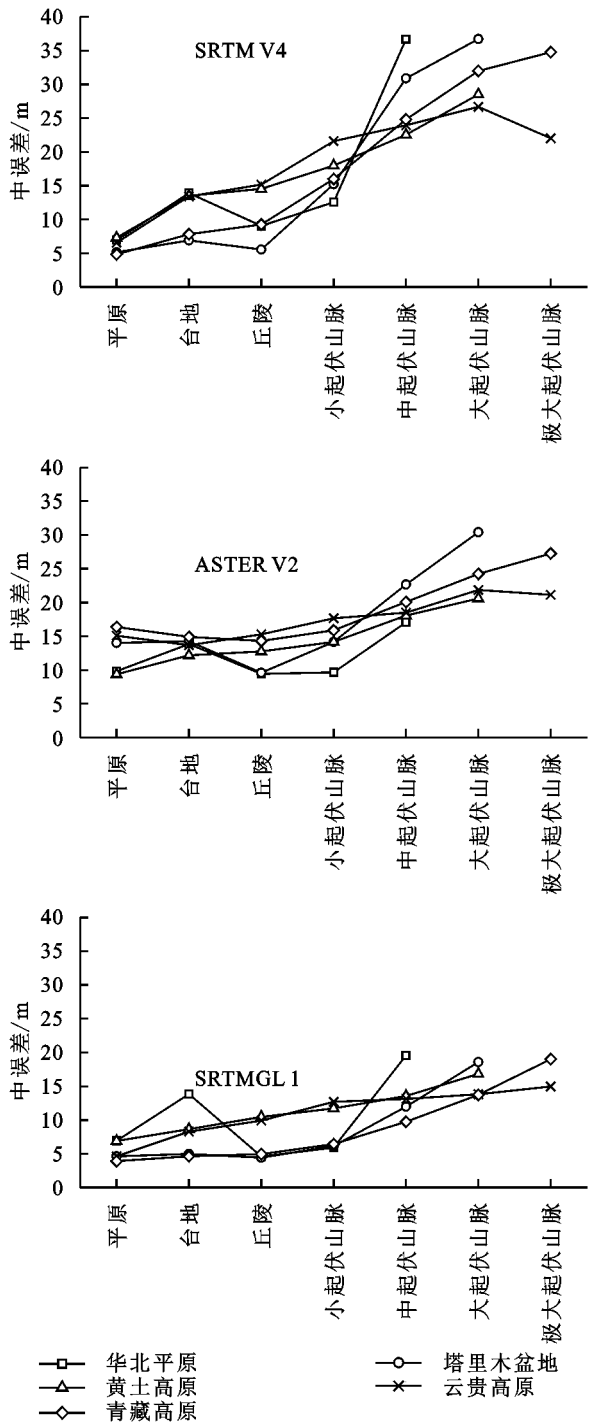


图7 各DEM不同研究区中误差和地貌的关系

## 4 结论

(1) 对比5个研究区共979 490个ICESat/



GLAS GLAH14 数据点, SRTM V4, ASTER V2 和 SRTMGL1 数据的总体平均误差分别为 2.2 m, 2.5 m 和 2.1 m, 误差标准差为 17.5 m, 16.3 m 和 8.2 m, 中误差分别为 17.7 m, 16.5 m, 8.4 m。总体而言, SRTMGL1 数据集的垂直精度要高于 ASTER V2, 而 ASTER V2 的总体高程精度则要略微优于 SRTM V4。

(2) SRTMGL1, ASTER V2 和 SRTM V4 均受到坡度、土地利用类型和地貌类型影响较大, 而坡向对于 DEM 的影响较小, 且误差分布较为均匀。坡度对 3 种 DEM 的影响总体趋势为: 坡度越高, 精度越差。SRTMGL1 在各个坡度分级区间数据精度均为最高, ASTER V2 和 SRTM V4 在坡度较小 ( $<15^\circ$ ) 时, ASTER V2 精度低于 SRTM V4, 当坡度  $>15^\circ$ , ASTER V2 精度开始优于 SRTM V4。3 种 DEM 在耕地和人造表面覆盖区域的精度最高, 在林地覆盖区域, DEM 精度最低<sup>[19]</sup>。

(3) 不同地貌分区对 3 种 DEM 的精度具有较大的影响。SRTM V4 随着海拔和地形起伏度的增大, 数据中误差递增明显, SRTMGL1 则随着地形起伏的变化, 差值变化幅度很小。3 种 DEM 在台地类型区域数据精度均低于平原和丘陵。ASTER V2 随着地貌变化(在山脉类型区域), 精度变化幅度较 SRTM V4 更加平稳, 数据精度更高。

本文对 SRTMGL1, SRTM V4 和 ASTER GDEM V2 的精度进行了详细的对比分析, 可以为这 3 种 DEM 数据在不同类型区域的应用提供一定的指导作用。数据选取的总体原则为: SRTMGL1 最优选, 其次, 平原为主地区选择 SRTM V4, 高原以及植被覆盖度高的地形复杂区域尽量选择 ASTER GDEM V2。

#### 参考文献:

- [1] Suwandana E, Kawamura K, Sakuno Y, et al. Evaluation of ASTER GDEM2 in comparison with GDEM1, SRTM DEM and topographic-map-derived DEM using inundation area analysis and RTK-dGPS data[J]. Remote Sensing, 2012, 4(8): 2419-2431.
- [2] Li P, Shi C, Li Z, et al. Evaluation of ASTER GDEM ver2 using GPS measurements and SRTM ver4.1 in China [J]. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012(1/4): 181-186.
- [3] Zhao S, Cheng W, Zhou C, et al. Accuracy assessment of the ASTER GDEM and SRTM3 DEM: an example in the Loess Plateau and North China Plain of China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(23): 8081-8093.
- [4] Jobin Thomas, V. Prasannakumar. Comparison of basin morphometry derived from topographic maps, ASTER and SRTM DEMs: an example from Kerala, India[J]. Geocarto International, 2015, 30(3): 346-364.
- [5] 赵尚民, 何维灿, 王莉. DEM 数据在黄土高原典型地貌区的误差分布[J]. 测绘科学, 2016, 41(2): 67-70, 102.
- [6] 南希, 李爱农, 边金虎, 等. 典型山区 SRTM3 与 ASTER GDEM 数据精度对比分析: 以青藏高原东麓深切河谷区为例[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(1): 91-98.
- [7] Jing C, Shortridge A, Lin S, et al. Comparison and validation of SRTM and ASTER GDEM for a subtropical landscape in Southeastern China[J]. International Journal of Digital Earth, 2014, 7(12): 969-992.
- [8] 胡加佩, 关小荣, 刘学军. 中国区域 SRTM DEM 与 ASTER GDEM 误差空间分布特征[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(4): 28-33.
- [9] 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.
- [10] 高志远, 谢元礼, 王宁练, 等. 青藏高原地区 3 种全球 DEM 精度对不同地形因子的响应[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 184-191.
- [11] 李国元, 唐新明, 张重阳, 等. 多准则约束的 ICESat/GLAS 高程控制点筛选[J]. 遥感学报, 2017, 21(1): 96-104.
- [12] 艾建华. 利用 ICESAT/GLAS 激光测高数据评估 SRTM 数据精度[J]. 测绘技术装备, 2015, 17(2): 63-66.
- [13] 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.
- [14] 陈楠, 汤国安, 朱红春. 不同空间分辨率 DEM 提取坡度不确定性研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 157-160.
- [15] Zhang Q, Yang Q, Wang C. SRTM Error Distribution and its Associations with Landscapes across China[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2016, 82(2): 135-148.
- [16] 杨小艳, 陈龙高, 陈龙乾, 等. 基于土地利用类型的 ASTER GDEM 精度评价: 以连云港为例[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(2): 377-385.
- [17] 吴文斌, 杨鹏, 张莉, 等. 4 类全球土地覆盖数据在中国区域的精度评价[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 167-173, 407.
- [18] 胡鹏, 吴艳兰, 胡海. 数字高程模型精度评定的基本理论[J]. 地球信息科学学报, 2012, 5(3): 64-70.
- [19] 张泉, 杨勤科, 程洁, 等. 中国地区 3"SRTM 高程误差特征[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2018, 43(5): 684-690.