

# 青藏高原地区 3 种全球 DEM 精度对 不同地形因子的响应

高志远<sup>1,2</sup>, 谢元礼<sup>1,2,3</sup>, 王宁练<sup>1,2,3</sup>, 蒋广鑫<sup>1</sup>, 周鹏<sup>1</sup>

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

**摘要:** [目的] 探究青藏高原地区 3 种全球 DEM 精度对不同地形因子的响应, 以便对全球 DEM 在各领域应用研究提供支撑。[方法] 以青藏高原地区作为研究区, 以 ICESAT/GLAS 的 GLAH14 高程数据作为高程参考数据, 研究 SRTM DEM, ASTER GDEM 和 HydroSHEDS DEM 的精度对坡度、坡向以及地形粗糙度等地形因子的响应规律。[结果] 总体上, SRTM DEM 精度最高, HydroSHEDS DEM 精度最低。不同地形因子对 3 种 DEM 精度均有不同影响。DEM 误差随着坡向分布呈不同的态势。其中 SRTM DEM 正负测量偏离值点分别集中在南坡向和西北坡方向; ASTER GDEM 正负测量偏离值点分别集中西北坡向和东南坡向; HydroSHEDS DEM 正负测量偏离值点分别集中在东坡向和西南坡向。3 种 DEM 精度与地形粗糙度均呈现较为明显的二次多项式关系。[结论] 在青藏高原地区, 3 种 DEM 精度均与地形要素有着不同程度相关性, SRTM DEM 精度最优且受地形要素影响程度小, HydroSHEDS DEM 精度最差, 受到地形要素的影响程度最大。

**关键词:** ICESAT/GLAS; 地形因子; DEM 精度评价; 青藏高原

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2019)02-0184-08

**中图分类号:** P208

**文献参数:** 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.02.030; Gao Zhiyuan, Xie Yuanli, Wang Ninglian, et al. Response of three global DEM Data accuracy to different terrain factors in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2):184-191.

## Response of Three Global DEM Data Accuracy to Different Terrain Factors in Qinghai-Tibet Plateau

Gao Zhiyuan<sup>1,2</sup>, Xie Yuanli<sup>1,2,3</sup>, Wang Ninglian<sup>1,2,3</sup>, Jiang Guangxin<sup>1</sup>, Zhou Peng<sup>1</sup>

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

2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China; 3. Institute of Earth Surface System and Hazards, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

**Abstract:** [Objective] This study investigated the response of three global DEM data's accuracy to different terrain factors in the Qinghai-Tibet Plateau region in order to provide support for application and research of global DEM in various fields. [Methods] This study takes GLAH14 DEM data of ICESat/GLAS as referential data to explore the responses of accuracies of SRTM DEM, ASTER GDEM and HydroSHEDS DEM to terrain factors, e. g., slope, aspect, and terrain roughness. [Results] In general, the accuracy of STRM DEM was the highest, while that of HydroSHEDS DEM was the lowest. Different terrain factors had different effects on three DEM accuracy. Three DEM errors present several trends because of aspect distribution. Specifically, positive and negative measurement deviation values in the SRTM DEM located in southern and northwestern aspects, ASTER GDEM in northwestern and southeastern aspects, and HydroSHEDS DEM in

收稿日期: 2018-09-12

修回日期: 2018-10-14

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 类战略先导科技专项“地球大数据科学工程”(XDA19070302)

第一作者: 高志远(1993—), 男(汉族), 陕西省西安市鄠邑区人, 硕士研究生, 研究方向为地理信息科学。E-mail: 799535434@qq.com.

eastern and southwestern aspects. There was obvious quadratic polynomial relationship between DEM accuracy and terrain roughness expressed as fractal dimension  $D$ . [Conclusion] In the Qinghai-Tibet Plateau region, there have different levels of correlation between DEM accuracy and terrain factors, where SRTM DEM accuracy is the highest with slight influence from terrain factors, on the contrary HydroSHEDS DEM accuracy is the lowest with intense influence from terrain factors.

**Keywords:** ICESAT/GLAS; terrain factors; DEM accuracy evaluation; Qinghai-Tibet Plateau

在地理学研究中,数字高程模型(digital elevation model, DEM)已成为一个重要且可靠的分析数据源,在土壤侵蚀、水土流失、流域分析、地貌分析以及地形因子提取方面有着十分广泛的应用。针对全球尺度 DEM 产品的精度评估工作已有不少进展。Rodriguez 等人<sup>[1]</sup>利用绝对地理误差、绝对高程误差和相对高程误差等精度指标对全球 6 大洲的 SRTM DEM 数据进行精度评估;Shortridge 等人<sup>[2]</sup>针对全美格局的景观结构对 SRTM DEM 精度影响进行了大范围的评估分析。但是对于特定地区 DEM 精度评价可能面临以下问题:第一,全球大尺度 DEM 精度评价结果不一定适用于特定区域的数字高程模型;第二,DEM 精度评价主要依赖于地面测量数据如 GPS 测量作为验证标准<sup>[3-4]</sup>,而地面测量数据对于特殊地理环境地区通常较难获取。高精度星载雷达(ICESAT/GLAS)数据的水平精度为 $\pm 20$  cm,高程精度为 $\pm 18$  cm,已有不少学者以 ICESAT/GLAS 高程数据为参考进行了相关的精度分析。EnBle 等人<sup>[5]</sup>利用 GLAH14 数据进行了树冠顶层、地面高程和植被高度的精度评价。Yue<sup>[6]</sup>利用 ICESAT/GLAS 高程数据对 ASTER GDEM 数据进行改正并与 SRTM DEM 数据的进行无缝融合。Liu 等人<sup>[7]</sup>利用经过 ICESAT/GLAS 数据纠正后的 ASTER 数据计算兰伯特冰川的变化率,结果表明其速率符合当期冰川的物质平衡。但是全球 DEM 在青藏高原地区的精度情况及其地形影响因素研究的比较少。为此,本文中选取 3 种的全球免费中分辨率 DEM 数据 SRTM DEM(shuttle radar topography mission digital elevation model),ASTER GDEM(the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer global digital elevation model)以及 HydroSHEDS,以星载激光雷达 ICESAT/GLAS 数据中的 GLAH14 数据为高程参考标准,针对青藏高原地区具体情况,对 SRTM DEM,ASTER GDEM 以及 HydroSHEDS DEM 这 3 种 DEM 进行整体的精度评价,并分别从坡度、坡向以及地形粗糙度等地形因子进行精度变化趋势及规律的探究。

## 1 研究区概况与方法

### 1.1 研究区概况

青藏高原是世界上面积最大的高原,同时也是世界上平均海拔最高的高原,有“世界屋脊”和“第三极”之称<sup>[8]</sup>,青藏高原总面积为 $2.60 \times 10^6$  km<sup>2</sup>,平均海拔 4 500 m,全球海拔超过 8 000 m 的 14 座山峰全部分布在该地区<sup>[9]</sup>。青藏高原是中国 3 个冻土主要聚集区域之一,分布有大量季节性冻土和部分多年冻土<sup>[10]</sup>,因为其冻土面积广泛,地表覆盖特征受植被季节性变化影响小。万杰等人<sup>[11]</sup>提出时间间隔为 4 a 的青藏高原 ICESAT/GLAS 数据和 SRTM DEM 数据的高程线性拟合的决定系数高达 0.999 8,因此在青藏高原地区利用多年 ICESAT/GLAS 数据进行 DEM 精度评价十分合适。本文研究区为青藏高原非冰雪覆盖区域。

### 1.2 研究数据

本次研究使用的数据主要包括 DEM 数据和 ICESAT/GALS 数据。DEM 数据包括 SRTM DEM, ASTER GDEM 和 HydroSHEDS。SRTM DEM 数据选用的是 SRTM V4 版本,SRTM V4 版本数据是针对 SRTM V2 版本的缺失数据进行插值补充;ASTER GDEM 为对地观测卫星 Terra 的近红外波段获取的立体像对生成的 DEM;HydroSHEDS DEM 是在 3 弧秒的 SRTM DEM 数据基础上,采用新改进和新开发的算法所生产的数据。3 类 DEM 数据对比如表 1 所示。ICESAT/GLAS 数据采用的是 GLAH14 数据,GLAH14 数据是由 GLAH05 数据和 GLAH06 数据再生产的陆地表面二级测高数据。GLA14 数据为散点记录方式,相邻点的距离为 172 m,与目前常见的数字高程模型相比 GLAH14 数据有更高的精度,因此可以当成 DEM 的验证标准来进行精度验证。ICESAT/GLAS 工作周期为 2003—2009 年,共 18 个工作时间段,数据来源于国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, <http://nsidc.org/>),试验中在 GLAH14 的 18 期数据序列中选取 300 000 余个数据点进行分析。

表 1 3 种 DEM 数据对比

数据类型	开发机构	分辨率/ m	垂直 精度/m	地理范围	下载地址
SRTM DEM	NASA/USGS	90	16	60°—56°N	http://srtm.csi.cgiar.org/
ASTER GDEM	METI/NASA	30	20	83°—83°N	http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/
HydroSHEDS DEM	USGS/CIAT/TNC	450	16	60°—56°N	https://hydrosheds.cr.usgs.gov/

### 1.3 数据预处理

由于 3 种 DEM 数据的参考椭球体与 GLAH14 数据不同,要对 GLAH14 数据进行预处理工作。预处理工作包括高程基准处理、参考椭球体处理和粗差剔除 3 部分。

1.3.1 高程基准处理 在 GLAH14 的数据集中,直接利用 HDFView 工具提取出大地水准面差距的数值  $t$ ,再利用公式(1)进行计算,把椭球体高程转化为正高(地面点沿过此点的重力线到大地水准面的距离)。

$$H_{T/P} = h - t \quad (1)$$

式中:  $H_{T/P}$ ——TOPHEX/Poseidon 椭球体的正高;  $t$ ——水准面差距。

1.3.2 参考椭球体处理 3 种 DEM 的参考椭球体都是 WGS84 椭球体,而 GLAH14 的参考椭球体是 TOPHEX/Poseidon 椭球体(T/P 椭球体)。椭球体之间的差异主要来源于水平差异和垂直差异两方面,两者在水平方向上的差异只有厘米级<sup>[12]</sup>,因此这里主要针对高程差异进行转换。表 2 为 TOPHEX/Poseidon 椭球体和 WGS84 椭球体参数对比,经计算可知,两种椭球体的高程差异约在 70 ~ 71 cm 之间,一般取 70 cm<sup>[13]</sup>。最后再利用公式(2)进行计算,求出 WGS84 的正高高程。

表 2 T/P 椭球体和 WGS84 椭球体参数对比

项目	T/P 椭球体	WGS84 椭球体
长半轴( $a$ )/m	6 378 136.300 00	6 378 137.000 00
短半轴( $b$ )/m	6 356 751.600 56	6 356 752.314 25
扁率( $f$ )	1/298.527 00	1/298.257 223
偏心率( $e$ )	0.081 82	0.081 82

$$H_{WGS84} = H_{T/P} - 0.70 = h - t - 0.70 \quad (2)$$

式中:  $H_{WGS84}$ ——WGS84 椭球体的正高;  $H_{T/P}$ ——TOPHEX/Poseidon 椭球体的正高。

1.3.3 粗差剔除 先剔除 NODATA 的数据点(数据异常值点),然后计算 GLAH14 数据点上对应的 3 种 DEM 的差值,高程差超过标准差 3 倍的数据点不参与统计。

### 1.4 精度指标

本文利用坡度、坡向以及地形粗糙度等地形因子,结合不同的精度指标,综合对 3 种 DEM 进行精

度评价以及地形因子的响应分析。本文利用高程的误差  $d$ ,平均误差 Mean 及中误差 RSME 作为评价精度的指标。其公式如式(3)~(5)所示。

$$d = h_{DEM} - h_{ICESAT/GLAS} \quad (3)$$

$$\text{Mean} = \frac{\sum d}{n} \quad (4)$$

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

其中高程误差  $d$  表示了数据集中每个 DEM 数据点高程与 GLAH14 数据之间的差值;平均误差表示数据集中 DEM 数据点高程与 GLAH14 数据的高程误差的平均值;中误差代表了数据集中 DEM 高程数据与相应 GLAH14 数据之间的离散程度,是评价精度的直接指标。综合研究 3 种 DEM 在不同的精度指标与各个地形因子之间的关系及变化规律。

针对 DEM 分形维数的计算方法,本文采用表面积—尺度法,表面积—尺度法也称作投影覆盖法,此方法由 Clarke 等人<sup>[14]</sup>于 1986 年首次提出,而后谢和平、周银军等人<sup>[15-16]</sup>又在此方法的基础之上做出了改进。首先,需要对原始的 DEM 栅格进行重采样,以分出不同的空间分辨率尺度  $R_i$ ,并且计算每一种空间分辨率尺度下 DEM 的表面积  $S_i$ 。而后,计算各个尺度下 DEM 分辨率尺度  $R_i$  的对数值以及其对应表面积  $S_i$  的对数值,并将其进行线性拟合,再在双对数坐标轴上找寻一段拟合较好的区域作为无标度区。虽然分形维数具有尺度不变性,但当尺度大到一定值时,粗糙表面根本不表现出分形性质<sup>[17]</sup>。因此只有当观测尺度介于一定范围内时,粗糙表面才能出现分形性质,因此需要寻找一个合适的尺度范围来计算分形维数  $D$ 。

### 1.5 试验方案

利用以上几种精度评价指标,先计算总体精度进行统计,然后结合坡度、坡向以及地表粗糙度等地形因子进行 3 种 DEM 精度的分析。在坡度因子分析中,对坡度进行离散化分级,级差根据地形特点选取  $1^\circ \sim 5^\circ$ ,在每个坡度级内统计 3 种 DEM 的平均误差和中误差,分析坡度对精度的影响。在坡向因子分析中,将坡向按照  $45^\circ$  范围分为 8 个坡向区域,在每个坡向区域内分别统计 3 种 DEM 的平均误差和中误差,分析坡向对精度的影响。分形维数的计算是在青藏

高原研究区选取 600 余个 ICESAT/GLAS 数据点较多分布的区域,每个区域大小为  $60\text{ km} \times 60\text{ km}$ (图 1),因为在  $60\text{ km}$  的空间尺度下,研究区地形有较为明显的分维特征。为了保证精度,地形因子采用 SRTM DEM 进行计算,将每个区域的 DEM 栅格进行重采样,采样分辨率范围为  $100 \sim 600\text{ m}$ ,以  $10\text{ m}$  作为间隔,最后利用求得的分形维数  $D$  与每个区域的中误差拟合,分析地形破碎度对精度的影响。

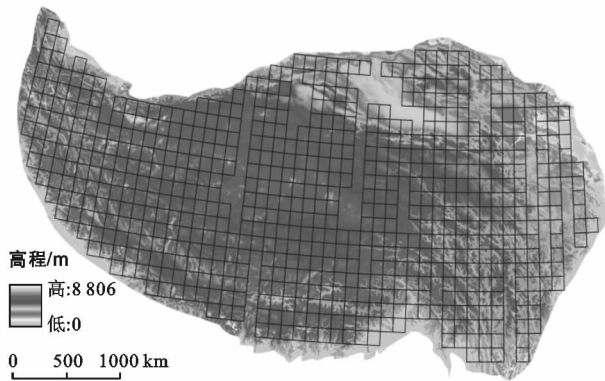


图 1 青藏高原分形维数试验分区

## 2 结果及分析

经过统计计算,青藏高原地区 SRTM DEM 平均误差为  $0.49\text{ m}$ ,中误差为  $14.29\text{ m}$ 。ASTER GDEM 平均误差为  $1.71\text{ m}$ ,中误差为  $18.81\text{ m}$ 。HydroSHEDS DEM 平均误差为  $4.17\text{ m}$ ,中误差为  $31.08\text{ m}$ 。其中,SRTM DEM 数据精度与万杰等人<sup>[11]</sup>在青藏高原地区研究得到的  $16.65\text{ m}$  高程中误差相当,ASTER GDEM 数据精度与杜小平等人<sup>[13]</sup>在中国西南地区高海拔山区得到的  $20.42\text{ m}$  高程中误差相接近。很明显地,在青藏高原地区,SRTM DEM 精度最高,HydroSHEDS DEM 精度最低。

### 2.1 坡度对 DEM 精度的影响

将 DEM 与 GLAH14 高程的高程误差  $d(h_{\text{DEM}} - h_{\text{ICESAT/GLAS}})$  按照点所在的坡度级进行统计,坡度级差设定为: $<1^\circ$ ,  $1^\circ \sim 5^\circ$ ,  $5^\circ \sim 10^\circ$ ,  $10^\circ \sim 15^\circ$ ,  $15^\circ \sim 20^\circ$ ,  $20^\circ \sim 25^\circ$ ,  $25^\circ \sim 30^\circ$ ,  $30^\circ \sim 35^\circ$ ,  $35^\circ \sim 40^\circ$ ,  $40^\circ \sim 45^\circ$ ,  $45^\circ \sim 50^\circ$  以及  $>50^\circ$  分别求出在各个坡度级中 3 种 DEM 的平均误差 Mean 和中误差 RSME,计算结果详见表 3。

表 3 各坡度区间 3 类 DEM 精度指标

DEM 数据	坡度	统计点数	平均误差/m	中误差/m	坡度	统计点数	平均误差/m	中误差/m
SRTM DEM	$<1^\circ$	36 689	1.776	3.382	$25^\circ \sim 30^\circ$	22 437	0.985	13.663
ASTER GDEM			1.440	16.316			5.466	23.192
HydroSHEDS DEM			2.490	5.472			2.215	54.939
SRTM DEM	$1^\circ \sim 5^\circ$	89 937	2.490	4.016	$30^\circ \sim 35^\circ$	16 596	1.376	15.948
ASTER GDEM			1.950	16.092			6.716	25.779
HydroSHEDS DEM			4.064	13.035			3.620	56.458
SRTM DEM	$5^\circ \sim 10^\circ$	50 323	1.874	5.926	$35^\circ \sim 40^\circ$	8 829	1.943	18.940
ASTER GDEM			2.240	15.446			7.889	29.280
HydroSHEDS DEM			5.810	32.558			3.307	57.287
SRTM DEM	$10^\circ \sim 15^\circ$	37 728	1.253	8.574	$40^\circ \sim 45^\circ$	3 413	4.110	26.415
ASTER GDEM			3.075	16.751			10.040	33.977
HydroSHEDS DEM			4.236	44.155			1.860	57.385
SRTM DEM	$15^\circ \sim 20^\circ$	31 306	0.839	10.723	$45^\circ \sim 50^\circ$	1 260	4.040	35.850
ASTER GDEM			3.760	18.515			12.870	36.968
HydroSHEDS DEM			2.142	49.966			1.587	57.316
SRTM DEM	$20^\circ \sim 25^\circ$	26 357	0.754	12.420	$>50^\circ$	860	0.412	44.595
ASTER GDEM			4.530	20.566			14.930	41.171
HydroSHEDS DEM			0.694	53.000			0.404	58.159

3 种 DEM 平均误差随坡度的变化及中误差随坡度的变化如图 2 所示。SRTM DEM 的平均误差在坡度为  $40^\circ \sim 45^\circ$  时较大,HydroSHEDS DEM 平均误差在坡度为  $0^\circ \sim 10^\circ$  及  $35^\circ \sim 45^\circ$  出现两个峰值,而 ASTER GDEM 的平均误差随坡度增大而增大。从中误差分析来看,SRTM DEM 数据高程精度在各个坡度上均优于

ASTER GDEM; HydroSHEDS DEM 中误差随坡度变化规律呈明显的对数关系,与 SRTM DEM 和 ASTER GDEM 的规律有很大的不同。在地形较为平坦地区(坡度小于  $5^\circ$ ),HydroSHEDS DEM 精度高于 ASTER GDEM 精度,但在坡度较大地区(坡度大于  $5^\circ$ ),则 ASTER GDEM 精度高于 HydroSHEDS DEM 精度。

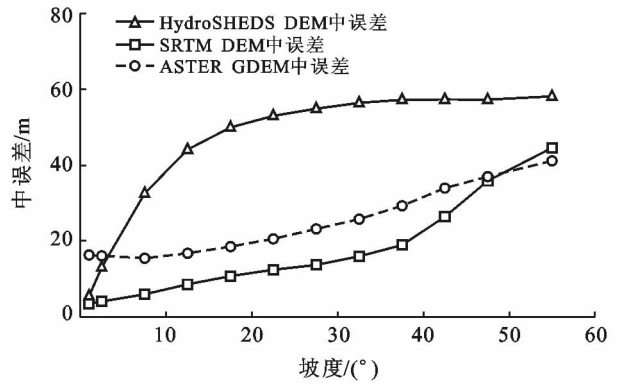
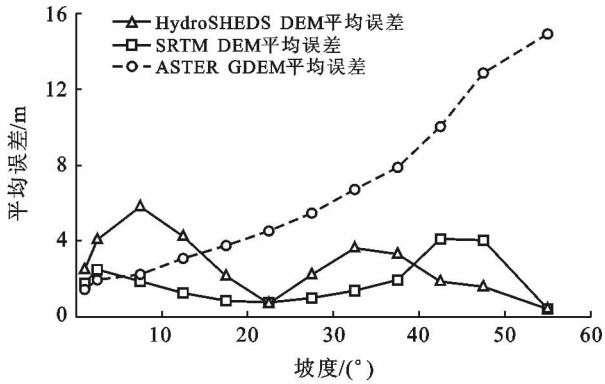


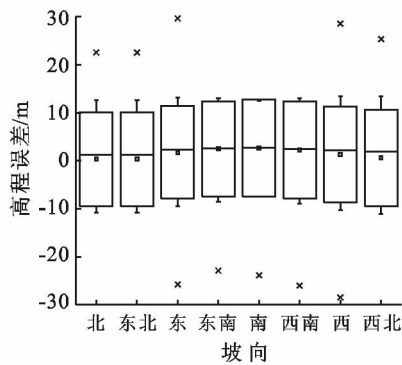
图 2 3 类 DEM 中误差和平均误差与坡度的关系

## 2.2 坡向对 DEM 精度影响

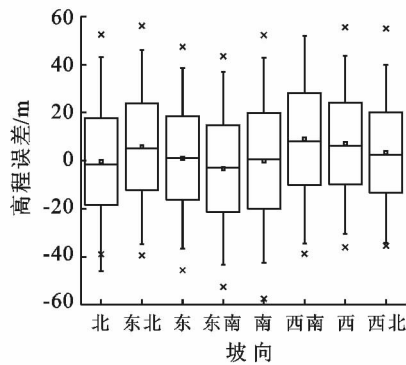
将坡向划分为北方向(337.5°~22.5°)、东北方向(22.5°~67.5°)、东方向(67.5°~112.5°)、东南方向(112.5°~157.5°)、南方向(157.5°~202.5°)、西南方向(202.5°~247.5°)、西方向(247.5°~292.5°)以及西北方向(292.5°~337.5°)8个坡向级。图3为3种DEM高程误差随坡向分异图,图中上下边缘代表了除数据异常值(大于或小于上下四分位数1.5倍四分位数差的数据)外的最大和最小值。3种DEM的高程误差分布均具有不同程°的坡向分异性特征,其中SRTM DEM的分异幅°最小,不同坡向的高程误差数据中位数接近,且均大于0,高程误差随坡向的分异特征不明显,南方向和东南方向SRTM DEM的高程

误差相对较大。相较于SRTM DEM,ASTER GDEM和HydroSHEDS DEM数据高程误差随坡向的分异性强,规律显著,且高程误差有明显的正负分布性。

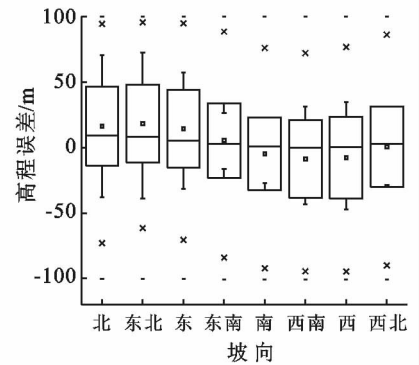
其中ASTER GDEM高程误差正值最大值分布在东北方向和西南方向,而高程误差负值在东南方向最大;HydroSHEDS DEM的高程误差则呈现明显的“东北—西南对称”分布,坡向为337.5°~157.5°时,高程误差总体倾向为正值,且误差在东北方向和北方向值最大,当坡向为157.5°~337.5°时,高程误差总体倾向为负值,误差在西南方向和南方向值最大。可见不同DEM测量值在不同坡向上的正负分布有一定差异性。



SRTM DEM



ASTER GDEM



HydroSHEDS DEM

图 3 青藏高原 3 种 DEM 高程误差随坡向分异

为了进一步研究这种差异规律特征,本文分别对测量值大于正2倍中误差和小于负2倍中误差数据点(下文中称为正负2倍中误差数据点,即 $d_i > 2RSME$ 和 $d_i < -2RSME$ )按照其在某一坡向数据点所占百分比进行计算统计,尝试探究DEM测量正偏离值、负偏离值随坡向的分异特征,结果如图4所示。

3种DEM测量偏离值的分布呈现不同的特征,且程度不同。SRTM DEM正负2倍中误差数据点主

要呈“南—北”分布,正2倍中误差数据点主要集中在南方向、西南方向和东南方向,其中南方向占比达3.23%,负2倍中误差数据点则主要出现在西北方向上,占比为3.07%,ASTER GDEM正负2倍中误差数据点呈现“西北—东南”分布,正2倍中误差数据点主要出现在西方向,占比为1.46%,负2倍中误差数据点主要集中在南方向,占比为0.89%。HydroSHEDS DEM正负2倍中误差数据点呈现“东北—西

南”分布,正 2 倍差数据点峰值分布在东方向上,占比为 21.52%,负 2 倍中误差数据点峰值位于西南方向,占比为 8.69%。

研究表明,SRTM DEM 测量正偏离值主要分布在南方向,而负偏离值主要分布在北方向。ASTER GDEM 测量正偏离值主要分布在西北方向,负偏离值分布在东南方向,HydroSHEDS DEM 测量正偏离

值分布在东北方向,负偏离值分布在西南方向。3 种 DEM 测量偏离值的离散程度不尽相同,HydroSHEDS DEM 的偏离程度最大,ASTER GDEM 的偏离程度最小。3 种 DEM 出现高程测量偏离值随坡向的分异特征的原因可能与卫星传感器在上升轨道和下降轨道的航向<sup>[2]</sup>以及 SRTM 传感器雷达与地表的入射角度有关。

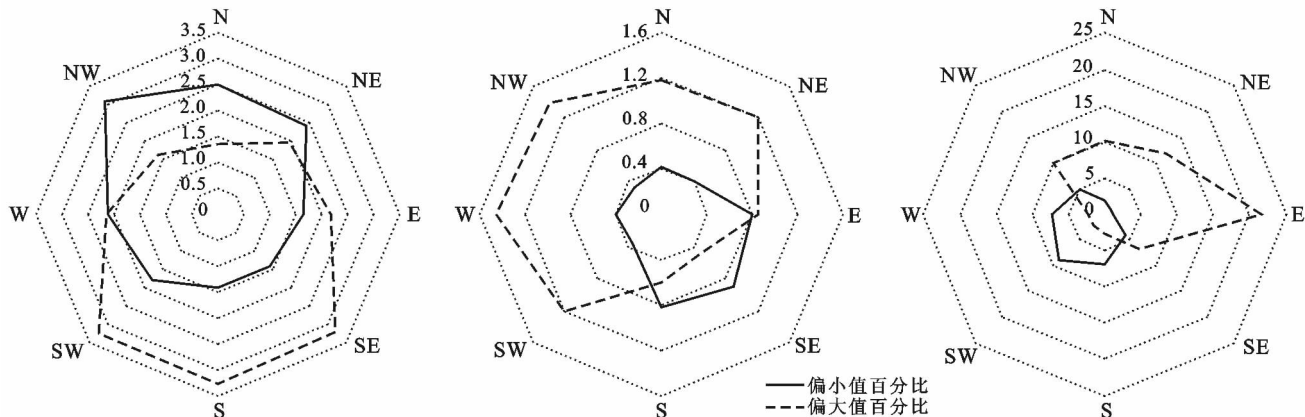


图 4 3 类 DEM 各坡向正负 2 倍中误差数据点占比

Zhang<sup>[18]</sup> 等人在研究地表覆盖对 SRTM DEM 精度的影响时将坡度进行分级固定,以排除坡度因子的干扰,本文利用这一思想进行坡度、坡向的控制变量分析。不同 DEM 的中误差随坡向变化规律不同,且随着坡度的增加,中误差随坡向变化幅度增大,呈现更加明显的坡向分异特征。

如图 5 所示,当坡向固定时,3 种 DEM 中误差随着坡度的增加,呈现增加趋势,其中 SRTM DEM 和 ASTER GDEM 在坡度大于 30° 时中误差迅速增加,HydroSHEDS DEM 在坡度大于 8° 时,精度迅速变差。而当坡度处于不同的特定区间时,3 种 DEM 精度的坡向分异规律也不同,其中 SRTM DEM 在各个坡度区间内中误差随坡向的分异规律均不明显,

ASTER GDEM 在坡度小于 16° 时,规律不显著,而当坡度大于 16° 时,坡向分异明显,且随着坡度的增加,规律愈发突出,其中最大中误差集中在西南方向,而在西北方向和北方向上精度最好,受到坡度的影响较小。HydroSHEDS DEM 在坡度小于 8° 时,各个坡向上的精度大致相当,且中误差均在 30 m 以内,当坡度大于 8° 时,HydroSHEDS DEM 中误差在不同坡向上呈现明显的“双峰”分布,即在东北方向和西南方向中误差往往较大,而在东南方向,精度相对较好。由以上分析可以发现,HydroSHEDS DEM 受到地形坡度的波动精度变异性更明显,并且相对 SRTM DEM 和 ASTER GDEM 其在更小的的坡度区间内就出现了明显的坡向分异性。

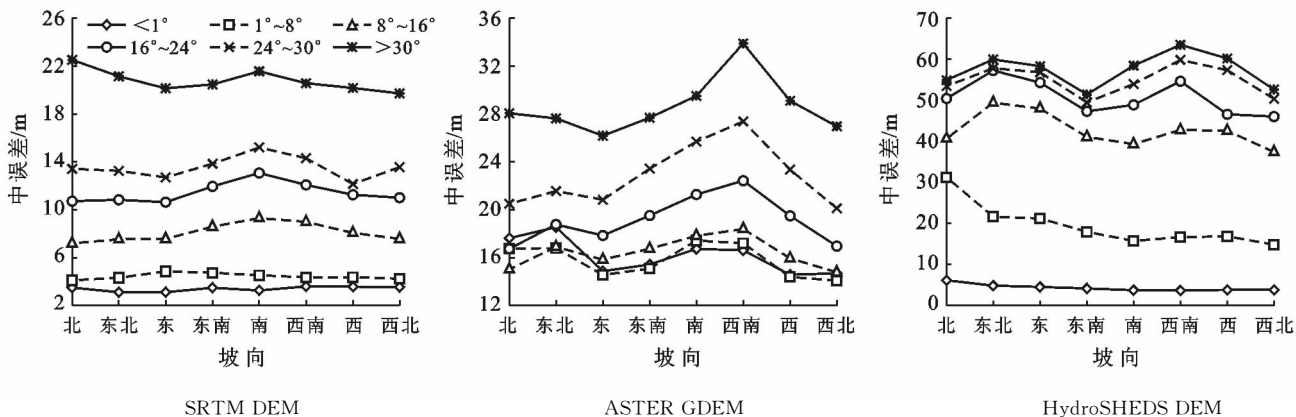


图 5 3 类 DEM 各坡向中误差分市

### 2.3 DEM 精度与地形粗糙度的关系

按照分形维数的计算步骤进行逐个样方的计算,每个样方中样点的数量从 168 到 756,656 个样方的分形维数  $D$  计算统计结果如表 4 所示。

表 4 分形维数  $D$  统计结果

分区个数	平均值	最大值	最小值	标准差
656	2.020 35	2.090 60	2.000 22	0.017

由图 6 可以看出,样方分形维数的分布主要集中在 2.00~2.06 之间,当分形维数大于 2.06 时,样方数迅速减少,而在 2.00~2.01 区间内的样方数最多,为 262 个,达到总数的 40%。

通过对 3 种 DEM 中误差与分形维数拟合,发现它们均呈现二次多项式关系,如图 7 所示。SRTM DEM 精度受到地形破碎度的影响较小,ASTER GDEM 次之,HydroSHEDS DEM 精度随地形破碎度

影响最大。当分形维数较大时( $D > 2.04$ )时,SRTM DEM 和 ASTER GDEM 中误差与分维数的相关性变弱,而 HydroSHEDS DEM 中误差与分维数一贯的相关性,可见 HydroSHEDS DEM 精度对地形破碎度响应较为敏感。

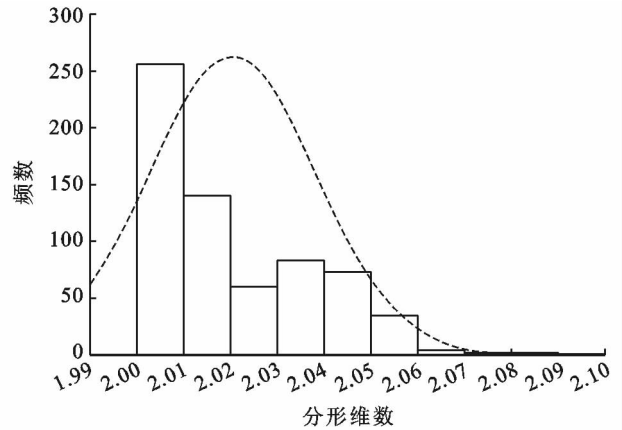


图 6 分形维数数频数

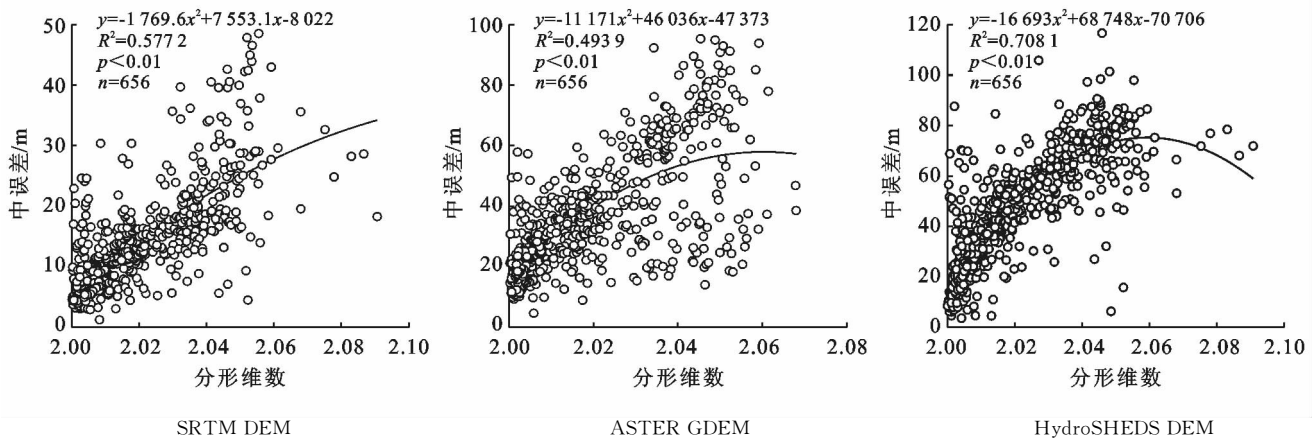


图 7 3 种 DEM 分形维数和中误差的关系

## 3 结论

(1) 在青藏高原地区,SRTM DEM 的精度最高,中误差为 14.29 m,ASTER GDEM 的精度次之,中误差为 18.81 m,HydroSHEDS DEM 精度最差,中误差为 31.08 m。

(2) SRTM DEM 精度随坡度变化趋势与 ASTER GDEM 趋势相似,但是在各坡度区间内略优于 ASTER GDEM。HydroSHEDS DEM 中误差随坡度变化呈明显的对数关系,在地形较为平坦地区(坡度小于  $5^\circ$ ),HydroSHEDS DEM 精度高于 ASTER GDEM 精度;但在坡度较大地区(坡度大于  $5^\circ$ ),ASTER GDEM 精度高于 HydroSHEDS DEM 精度。

(3) SRTM DEM 误差正偏离主要位于南坡向,而负偏离主要分布在北坡向;ASTER GDEM 误差正偏离主要分布在西北坡向,负偏离分布在东南坡向;HydroSHEDS DEM 误差正偏离主要分布在东北坡向,负偏离主要分布在西南坡向。HydroSHEDS DEM 测量偏离值的离散程度最大,ASTER GDEM 离散程度最小。

(4) SRTM DEM 中误差在不同坡度、各个坡向上分异幅度较小,具有一定的同质性;ASTER GDEM 在坡度大于  $16^\circ$  时分异性较强,中误差峰值出现在西南坡向;HydroSHEDS DEM 在坡度大于  $8^\circ$  时分异性较强,最大中误差分布在西南和东北坡向。

(5) 分形维数  $D$  和 3 种 DEM 中误差拟合均呈较为明显的二次多项式关系,分形维数越小,分形维数

对 DEM 精度的影响越大。其中分形维数对 HydroSHEDS DEM 精度影响最大,对 SRTM DEM 精度影响最小。

### [参 考 文 献]

- [1] Belz J E, Rodriguez E, Morris C S. A global assessment of the SRTM performance[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2015,72(3):249-260.
- [2] Shortridge A, Messina J. Spatial structure and landscape associations of SRTM error[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(6):1576-1587.
- [3] Braun A, Fotopoulos G. Assessment of SRTM, ICESat, and survey control monument elevations in Canada [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007,73(12):1333-1342.
- [4] Hirt C, Filmer M S, Featherstone W E. Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver 4. 1 and GEODATA DEM-9 S ver 3 digital elevation models over Australia[J]. *Journal of the Geological Society of Australia*, 2010,57(3):337-347.
- [5] EnBle F, Heinzl J, Koch B. Accuracy of vegetation height and terrain elevation derived from ICESat/GLAS in forested areas[J]. *International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation*, 2014, 31(1): 37-44.
- [6] Yue Linwei, Shen Huanfeng, Zhang, Liangpei, et al. High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2017,123:20-34.
- [7] Liu Jun, Tong Xiaohua, Liu Shijie, et al. Glacier mass change evaluation in Lambert-Amery area from 2002 to 2012 using ASTER stereo images and ICESat GLAS laser altimetry[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014,17(1):1-5.
- [8] Zhang Guoqing, Xie Hongjie, Kang Shichang, et al. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data(2003—2009)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(7):1733-1742.
- [9] 王雪梅,李新,马明国,等. 青藏高原科研文献地理信息空间分析研究[J]. *地球科学进展*. 2012,27(11):1288-1294.
- [10] 陈博. 中国冻土的时空变化特征[C]//中国气象学会,中国气象学会 2006 年年会“气候变化及其机理和模拟”分会场论文集. 2006.
- [11] 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.
- [12] 陈国栋. 利用 ICESat 数据确定北极冰雪消融方法的研究[D]. 湖北 武汉:武汉大学,2015.
- [13] 杜小平,郭华东,范湘涛,等. 基于 ICESat/GLAS 数据的中国典型区域 SRTM 与 ASTER GDEM 高程精度评价[J]. *地球科学:中国地质大学学报*,2013,38(4):887-897.
- [14] Clarke K C. Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method[J]. *Computers & Geosciences*, 1986,12(5):713-722.
- [15] Xie Heping, Wang Jin-an, Stein E. Direct fractal measurement and multifractal properties of fracture surfaces[J]. *Physics Letters A*, 1998, 242(1/2): 41-50.
- [16] 周银军,陈立,刘欣桐,等. 河床表面分形特征及其分形维数计算方法[J]. *华东师范大学学报:自然科学版*, 2009,2009(3):170-178.
- [17] 周宏伟,谢和平, KWASNIEWSKIMA. 粗糙表面分维计算的立方体覆盖法[J]. *摩擦学学报*,2000,20(6): 455-459.
- [18] Zhang Quan, Yang Qinke, Wang Chunmei. SRTM error distribution and its associations with landscapes across China[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2016,82(2):135-148.
- loss equation[C]// *Proceedings-Process of soil erosion and its environment effect*, 12th international soil conservation organization conference, Beijing, Tsinghua University Press, 2002.
- [17] 章文波,谢云,刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. *地理科学*,2002,22(6):705-711.
- [18] 杨韶洋. 基于 CSLE 模型的沂蒙山国家级重点治理区土壤侵蚀格局分析[D]. 山东 泰安:山东农业大学, 2014.

(上接第 183 页)

- [14] 邹丛荣,齐斐,张庆红,等. CSLE 模型应用中不同抽样密度和推算方法的比较[J]. *中国水土保持科学*,2016, 14(3):130-138.
- [15] Zhang Hongda, Zhang Ronghua, Qi Fei, et al. The CSLE model based soil erosion prediction: Comparisons of sampling density and extrapolation method at the county level [J]. *Catena*, 2018,165:465-472.
- [16] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An empirical soil