

# 陕北黄土区 SRTMDEM 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</sup>, 刘 状<sup>1,2</sup>, 蒋广鑫<sup>1</sup>

(1. 西北大学, 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)

**摘 要:**以陕北黄土沟壑区域作为研究区,以 1 弧秒 SRTM DEM 数据作为研究对象,以 ICESat/GLAS 的 GLA14 高程数据作为高程参考数据,利用地理探测器的空间分异性研究方法,来研究高程、坡度、坡向、总曲率、剖面曲率以及平面曲率等地形因子对 SRTM DEM 数据精度的影响,并结合其影响研究了地表粗糙度与 SRTM DEM 精度之间的相关关系。结果表明:源数据 SRTM DEM 在研究区范围内系统误差为 $(0.470 \pm 9.520)$  m,精度为 9.531 m。单地形因子对 SRTM DEM 精度的影响要比不同因子两两综合的影响小,其中坡度因子和曲率因子对精度的影响程度较大,高程、坡向因子对精度的影响程度较小。分形维数较常见的几种地形因子对数据精度的影响程度更大,分形维数与数据中误差呈现二次多项式的关系,并且随着分形维数的增加,SRTM DEM 中误差逐渐增大,增长率逐渐减小,直到峰值。

**关键词:**ICESat/GLAS; SRTMDEM; 地形因子; 地理探测器; 分形维数

中图分类号:P237

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)03-0174-05

## Response of SRTM DEM Accuracy to Different Terrain Factors in the Loess Area of Northern Shaanxi Province

GAO Zhiyuan<sup>1,2</sup>, XIE Yuanli<sup>1,2</sup>, LIU Zhuang<sup>1,2</sup>, JIANG Guangxin<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)

**Abstract:** We focused on the relationship between the accuracy of DEM and terrain factors. The gullies region of Northern Shaanxi was taken as the research area. In terms of elevation reference data, the vertical accuracy of ICESat/GLAS GLA14 data can reach 18 cm and the horizontal accuracy can reach 20 cm, which is used as the reference data of elevation standard. To study the influence of six topographic factors such as elevation, slope, aspect, total curvature, section curvature and plane curvature on the accuracy of SRTM DEM data, We not only used the geographical detectors analysis method, but also used the fractal dimension method to probe into the relationship between surface roughness and the SRTM DEM accuracy. Fractal dimension, as a dimensionless parameter, can better express the differentiation characteristics of the surface and preserve the original morphological characteristics of the surface. The results show that accuracy of the SRTM DEM is 9.531 meters in the study area. The influence of single terrain factor on the precision of SRTM DEM is smaller than that of different factor superposition, in which slope factor and curvature factor have great influence on accuracy, and the influence of elevation and aspect factor on accuracy is relatively small. The fractal dimension has a greater influence on the accuracy of data, and RSME of SRTM DEM increases gradually, and the growth rate decreases gradually until the peak value with the increase of fractal dimension.

**Keywords:** ICESat/GLAS; SRTM DEM; terrain factors; geographical detector; fractal dimension

SRTM DEM (Shuttle Radar Topography Mission) 是全球最常见的免费中分辨率数字高程模型之一,在土壤侵蚀、水土流失、流域分析、地貌分析等地理学各个领域都有着十分广泛的应用。SRTM DEM

的精度相较于另一种常见的中分辨率数字高程模型 ASTER GDEM,不但在绝大部分区域内精度优于 ASTER GDEM<sup>[1]</sup>,并且 SRTM DEM 在地形较为复杂的地区其误差与地形具有较强的相关性<sup>[2]</sup>,即其误

差随地形变化的敏感性较 ASTER GDEM 更强,因此利用 SRTM DEM 作为数据源进行精度与地形因子研究较为合适。

现阶段,SRTM DEM 精度评价研究已取得了不少进展,Rodriguez 等<sup>[3]</sup>利用 USGS 发布的 NED (National Elevation Dataset)数据集作为高程标准数据,对全美 SRTM DEM 进行了精度评价。Manas 等<sup>[4]</sup>利用动态全球定位系统,对全球 6 个大陆的 SRTM DEM 产品的绝对高程误差和相对高程误差进行了评估。而后 Mukul 等<sup>[5]</sup>又提出利用全球定位系统网络 IGS(International Global Navigation Satellite System Service Network)分别对 X 波段和 C 波段的 SRTM DEM 数据进行了全球性的精度比较和评估。Zhao 等<sup>[6]</sup>人利用 ICESat/GLAS 数据对中国中部地区的 ASTER GDEM 与 SRTM DEM 数据进行精度比较分析。詹蕾等<sup>[7]</sup>以我国 1:5 万比例尺 DEM 数据作为参考数据,利用空间插值的方法对全陕西省的 SRTM DEM 数据进行了精度评价。在地形因子的研究中,张泉等<sup>[8]</sup>提出 SRTM DEM 误差与不同地形和地表覆盖密切相关,坡度增大,误差由正变负,误差绝对值增大。张朝忙等<sup>[9]</sup>在研究中国地区 SRTM DEM 精度时提出 DEM 数据高程精度受地形影响并存在一定的空间分布性。杜小平等<sup>[10]</sup>提出 DEM 的高程误差随地形起伏增加而增加。南希等<sup>[11]</sup>提出 DEM 数据垂直精度对坡度有较大的依赖性,且中误差随坡度有近似指数的曲线的增长趋势。可以说不管是全球大尺度还是地区小尺度,SRTM DEM 的研究工作已有不小进展,但针对影响 SRTM DEM 精度的地形因子的研究工作却比较少,在以往的研究工作中,研究者也倾向于将研究精力投入在 DEM 精度的评估工作,而涉及到地形因子的影响性时也偏向于做定性的试验性结论陈述,而未做详细的定量研究。本文利用 ICESat/GLAS GLA14 陆地测高数据作为高程标准数据,结合不同的地形因子综合分析,对 1 弧秒 SRTM DEM 精度随地形因子的变化进行量化研究。

## 1 研究区概况和数据

### 1.1 研究区概况

研究区以陕北典型黄土沟壑地貌为主要研究地貌类型,其大致范围为东经 108.7°—110.5°,北纬 37.0°—38.1°。包括了陕西省延安市的子长县和安塞县的一部分,以及榆林市的子洲县、米脂县全境和横山县、靖边县、佳县与绥德县的部分地区,总面积约为 20 000 km<sup>2</sup>。黄土沟壑地区沟壑纵横、地形破碎、

地形起伏度较大,各种地形因子变化较为明显,因此把黄土沟壑地区作为 DEM 地形因子评价的试验样区是比较合适的。

### 1.2 研究数据及处理

本文中研究数据分为两种,一种是 SRTM DEM 数据,将其作为精度评估原始数据,具体为 SRTM1 Arc-Second Global,其空间分辨率为 30 m,下载自(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。第 2 种是 GLA14 测高数据,GLA14(Global Land Surface Altimetry Data)数据隶属于 ICESat/GLAS 数据集中的二级产品,由 GLA 05 和 GLA 06 数据再生产,其传感器每秒发射 40 次脉冲亮斑,星下光斑点的直径为 70 m,沿卫星轨迹相邻两光斑间隔为 170 m, GLA14 水平精度为 ±20 cm,垂直精度为 ±18 cm<sup>[8-9]</sup>。综合比较两种数据可以看出, GLA 14 数据较 SRTM DEM 数据具有较高的精度,其垂直精度和水平精度都达到了 cm 级,因此可以作为评测 SRTM DEM 精度的标准对比数据, GLA 14 数据来源于美国国家冰雪数据中心,下载自(<http://nsidc.org/>)。

## 2 研究方法

### 2.1 精度评价指标

在本文研究中,引用 4 个指标量作为精度评价及地形因子分析的参考指标,分别为高程误差  $d$ 、平均误差 Mean、标准偏差 SD 和中误差 RSME。高程误差  $d$  代表了每一个 GLA14 数据点与对应 SRTM DEM 栅格点的差值( $H_{\text{SRTM}} - H_{\text{GLA14}}$ ),平均误差 Mean 是高程误差的平均值,是数据集中误差的平均体现。标准偏差 SD 表示高程误差之间数据离散的程度。中误差 RSME 是指测量值与真值之间的离散程度,是对测量值精度最直接的评价。4 种指标公式如式(1—4)<sup>[10-13]</sup>所示。

$$d = H_{\text{SRTM}} - H_{\text{GLA14}} \quad (1)$$

$$\text{Mean} = \frac{\sum d}{n} \quad (2)$$

$$\text{SD} = \sqrt{\frac{\sum (d - \text{Mean})^2}{n}} \quad (3)$$

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

### 2.2 地形因子与地理探测器

本研究中,引入高程、坡度、坡向、总曲率、平面曲率以及剖面曲率 6 种地形因子对 SRTM DEM 精度进行相关性分析。除了常规的几种地形因子高程、坡度和坡向外,还涉及到了 3 种曲率因子,其中平面曲率反映了地形在等高线方向的变化率,表达了坡向的

变化;剖面曲率是一种对地形在最大坡度方向上高程的变化的度量,是地面坡度的变化率,高程变化的二阶导,是坡度的坡度;总曲率是平面曲率、剖面曲率与正切曲率的和,是地表复杂度和破碎度的一种度量方式。假设  $z=f(x,y)$  是地形曲面函数,并且函数连续、二阶可导,则剖面曲率  $K_V$  和平面曲率  $K_C$  的计算公式如式(5—6) [14-16] 所示。

$$K_V=\frac{-(rp^2+2sp+tp^2)}{(p^2+q^2)(p^2+q^2+1)^{3/2}}$$

(5)

$$K_C=\frac{-(rp^2-2sp+tq^2)}{(p^2+q^2)^{3/2}}$$

(6)

式中: $p$  是指  $x$  方向上的高程变化率; $q$  指  $y$  方向上的高程变化率; $s$  表示  $x$  方向高程变化在  $y$  方向的变化率; $t$  是指  $y$  方向高程变化的变化率; $r$  是指  $x$  方向上高程变化的变化率。

为了探求上述 6 种地形因子与 SRTM DEM 精度之间的关系,本文引入地理探测器的手段进行因子的相关性分析。地理探测器是一种新型的空间统计方法,它的基本原理继承了亚里士多德以来人类认识自然环境的主要方法。即空间分异表达,是一种能够揭示背后驱动因子的统计学方法,不同于常规的相关性分析,地理探测器具有更高的空间敏感性,能够更加直接地揭示自变量与因变量之间的关系。此方法不但能够同时参与多因子的相关性分析,并且可以揭示自变量因子间的交互影响对因变量的影响。本文中应用王劲峰等[17]开发的代码进行计算,代码下载自(<http://www.geodetectors.org>)。

2.3 分形维数的计算

本文中所采用的是表面积—尺度的方法来计算地表的分形维数,表面积—尺度法也称为投影覆盖法,由 Clarke[18] 等人首次提出,其主要过程如下:首先对原始 SRTM DEM 进行重采样,得到不同空间分辨率的数据。然后记录每一分辨率 DEM 的尺度  $R_i$  并且计算对应尺度下的栅格表面积  $S_i$ ,再利用线性拟合原理拟合  $\lg R_i$  与  $\lg S_i$ ,并在双对数坐标轴上选取一段拟合度最好的一段无标度区[19],记录下此时的拟合线性斜率  $K$ ,最后由  $D=2-K$  计算得到分形维数。

在进行分维数的计算前,首先需要选择样区,在本文中共选取 78 个分形维数计算样区,计算样区面积大小为 5 km×5 km,且样区中包含数量较多的 GLA14 数据点。

3 结果与分析

3.1 SRTM DEM 精度评价

对 SRTM DEM 数据进行精度评价,做出 GLA 14 与 SRTM DEM 散点图,可以发现两者之间存在明显

的线性递增关系,做出线性拟合方程,发现其斜率为 1.000 9,决定系数  $R^2$  为 0.997 2(图 1),其拟合性极强,对其做 ANOVA 检验,发现其  $p$  值约为 0,显著性明显。可以看出,SRTM DEM 精度总体上与 GLA14 数据存在较为明显的相关性和一致性。图 2 为高程误差  $d$  的频数直方图,可以看出高程误差正值的个数明显多于负值的个数,总数上前者比后者多 18.45%,为 8 732 个,这表明在试验样区内,多数 SRTM DEM 测量值较 GLA14 值偏大,其数据系统误差为  $(0.470\pm9.520)$  m,数据精度为 9.531 m。

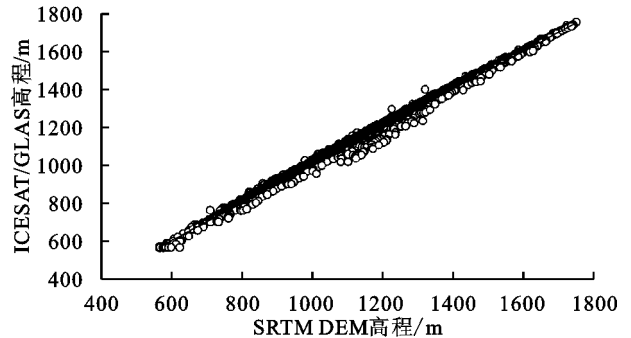


图 1 GLA14 与 SRTM DEM 拟合

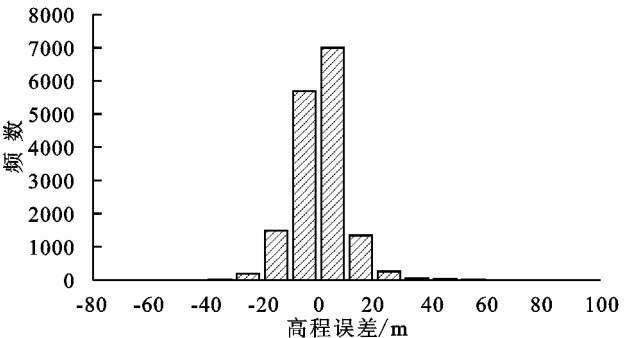


图 2 高程误差频数

3.2 多因子分析

按照地理探测器的算法要求,将高程、坡度、坡向、总曲率、剖面曲率和平面曲率按照数量级进行分类。因为总曲率、剖面曲率以及平面曲率值的正负只代表该栅格表面开口的凹凸性,因此这里对三者进行绝对值处理,保证其值的大小代表了不同维度上地表的破碎程度。

设高程误差绝对值为因变量  $Y$ ,高程因子为自变量  $X_1$ ,坡度因子为自变量  $X_2$ ,坡向因子为自变量  $X_3$ ,总曲率因子为自变量  $X_4$ ,剖面曲率因子为自变量  $X_5$ ,水平曲率因子为自变量  $X_6$ ,具体详情见表 1。

将各地形因子分级后利用地理探测器进行解算,高程误差绝对值  $Y$  的地形因子分析结果见表 2。

表 1 高程误差绝对值  $Y$  各因子探测

参数	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
$q$ 统计值	0.0120	0.0638	0.0035	0.0337	0.0330	0.0303
$p$ 检验值	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

表 2 高程误差绝对值 Y 各因子探测

因子	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
$X_1$	0.0120					
$X_2$	0.0744	0.0638				
$X_3$	0.0173	0.0707	0.0035			
$X_4$	0.0436	0.0851	0.0385	0.0337		
$X_5$	0.0423	0.0849	0.0370	0.0502	0.0330	
$X_6$	0.0414	0.07746	0.0340	0.0531	0.0608	0.0303

在显著性水平 0.05 的情况下(表 1),6 种地形因子皆具有显著性的统计学差异,其中坡向因子  $X_3$  的  $q$  统计值最小,仅有 0.003 5,这里可以认为坡向因子对高程误差绝对值的影响极小。而坡度因子  $X_2$ ,总曲率因子  $X_4$ ,剖面曲率因子  $X_5$  与平面曲率因子  $X_6$  的  $q$  统计值较其他因子明显较大,四者之中,坡度因子  $X_2$  的  $q$  值最大,为 0.063 8,说明了有 6.38% 的数据点高程误差绝对值  $Y$  受到坡度的影响,总曲率因子  $X_4$ ,剖面曲率因子  $X_5$  和平面曲率因子  $X_6$  的  $q$  值相当,分别是 0.033 7,0.330,0.030 3,即 3 种因子分别解释了 3.37%,3.30% 和 3.03% 数据点的高程误差绝对值。而由表 2 可以看出,坡度因子与曲率因子之间的叠加以及各类曲率因子之间的叠加对高程误差绝对值的影响较大,其中总曲率因子  $X_4$  与坡度因子  $X_2$  的叠加和高程误差绝对值的相关性最强, $q$  统计值为 0.085 1,说明了上述两者因子的叠加解释了 8.51% 的数据点的高程误差绝对值  $Y$ 。

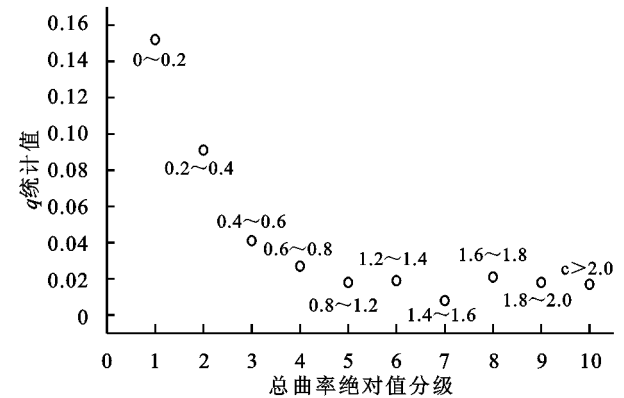


图 3 坡度因子  $q$  统计值与总曲率分级关系

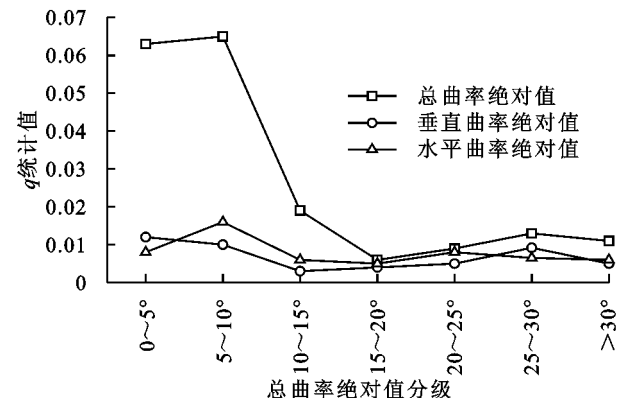


图 4 3 种曲率  $q$  统计值与坡度分级关系

研究发现,曲率和坡度是影响高程误差较为显著的两种地形因子。由图 3 可以看出,在总曲率绝对值小于 0.8 时,坡度因子的  $q$  统计值与总曲率绝对值呈现负相关关系,在总曲率绝对值为 0~0.2 时,坡度因子  $q$  统计值最大,为 0.152,即坡度因子能够解释 15.2% 数据点的高程误差绝对值,当总曲率绝对值大于 0.8 时,坡度因子统计值  $q$  大致维持在 0.018 左右,坡度因子对高程误差绝对值的解释性较差。3 种曲率因子  $q$  统计值在不同坡度分级呈现不同的分异特征(图 4),其中剖面曲率因子和平面曲率因子  $q$  统计值随坡度分级的变化,分异性不大,而总曲率因子  $q$  统计值在坡度小于 10° 时较大,当坡度为 0°~5° 和 5°~10° 时,总曲率因子统计值  $q$  分别为 0.063,0.065,总体上,当坡度较小时,总曲率因子  $q$  统计值较大,当总曲率因子较小时,坡度因子  $q$  统计值较大。

3.3 分形维数分析

计算出每个分形维数样区内的平均误差 Mean 和中误差 RSME,利用地理探测器进行计算,令分形维数  $D$  为自变量  $X$ ,平均误差为因变量  $Y_1$ ,中误差为因变量  $Y_2$ ,结果见表 3。

表 3 分形维数因子探测表

参数	$X/Y_1$	$X/Y_2$
$q$ 统计值	0.3704	0.6726
$p$ 检验值	0.0000	0.0000

在显著性水平 0.05 的情况下,两者的  $p$  检验值都小于 0.05,具有显著性的统计学差异,分形维数与平均误差的  $q$  统计值为 0.370 4,说明分维数可以解释 37.04% 分维数样区的平均误差,而分形维数与中误差的  $q$  统计值为 0.672 6,说明分维数可以解释 67.26% 分维数样区的中误差。可见相比较高程、坡度、坡向、总曲率、剖面曲率与水平曲率这些普通的地形因子,SRTM DEM 误差与分形维数的相关性更高。

为了进一步了解分形维数与平均误差及中误差的关系,对其进行拟合分析,结果与地理探测器的结果相一致,见图 5—6,两种精度指标量均与分形维数存在明显的相关关系,相比平均误差,中误差与分形维数的相关性更强,决定系数  $R^2$  达到了 0.683 3。平均误差和中误差均与分形维数存在二次多项式的拟合关系,在研究区内,平均误差随着分形维数的增大先减少后增大,其平均误差最小值出现在分形维数为 2.034 左右,最小值约为 0.260 m。中误差和分形维数的拟合趋势随着分形维数的增大,中误差呈现增大的趋势,其最大值时的分形维数约为 2.046,最大值为 13.42 m,在研究区内其中误差随分形维数变化处于一直增加的状态,增长逐渐趋于平稳,直到峰值。

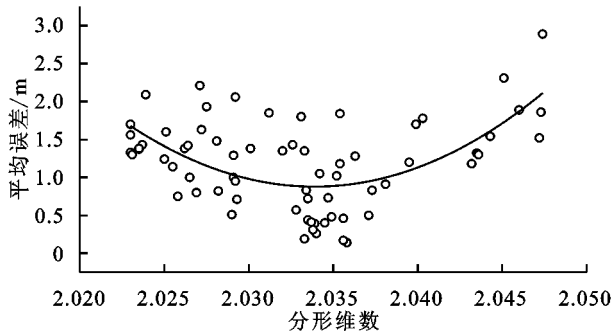


图 5 平均误差与分形维数拟合

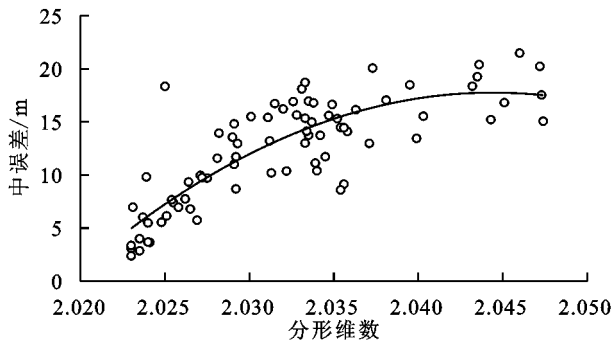


图 6 中误差与分形维数拟合

## 4 结论

(1) 在黄土沟壑研究区域内, SRTM DEM 高程平均误差为 0.470 m, 高程误差标准偏差为 9.520 m, 数据精度为 9.531 m, 在研究区内符合 SRTM DEM 理论精度。

(2) 单一地形因子对 SRTM DEM 精度的影响非常小, 具体来讲, 高程因子、坡向因子对数据精度的影响最小, 坡度因子对精度影响相对最大; 地形因子两两叠加后对精度的影响较单因子变大, 其中坡度因子与曲率因子综合后对精度的影响相对最大, 并且当坡度较小时, 总曲率因子  $q$  统计值较大, 当总曲率因子较小时, 坡度因子  $q$  统计值较大。

(3) 地表粗糙度(分形维数)对数据精度的影响较为明显, 其作为地表自变量因子能够解释 37.04% 的样区的平均误差, 对中误差的解释程度达到了总样区数目的 67.26%。分形维数与平均误差和中误差具有比较明显的二次多项式拟合关系。

### 参考文献:

[1] 郭笑怡, 张洪岩, 张正祥. 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.

[2] 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.

[3] Shortridge A, Messina J. Spatial structure and landscape as-

sociations of SRTM error[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(6): 1576-1587.

- [4] Manas M, Vinee S, Malay M. Analysis of the accuracy of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) height models using International Global Navigation Satellite System Service(IGS) Network[J]. Journal of Earth System Science, 2015, 124(6): 1343-1357.
- [5] Mukul M, Srivastava V, Mukul M. Accuracy analysis of the 2014—2015 Global Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 arc-sec C-Band height model using International Global Navigation Satellite System Service (IGS) Network[J]. Journal of Earth System Science, 2016, 125(5): 1-9.
- [6] Zhao G, Xue H, Ling F. Assessment of ASTER GDEM performance by comparing with SRTM and ICESat/GLAS data in Central China[C]. International Conference on Geoinformatics. Ieee, 2010: 1-5.
- [7] 詹蕾, 汤国安, 杨昕. SRTM DEM 高程精度评价[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(1): 34-36.
- [8] 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.
- [9] 张朝忙, 刘庆生, 刘高焕. 中国地区 SRTM3 DEM 高程精度质量评价[J]. 测绘工程, 2014, 23(4): 14-19.
- [10] 杜小平, 郭华东, 范湘涛. 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.
- [11] 南希, 李爱农, 边金虎. 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.
- [12] Feng L, Muller J P. Icesat validation of tandem-xi-dems over the UK[J]. International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing & spatial Information Sciences, 2016, 41: 129-136.
- [13] 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.
- [14] 刘学军, 王叶飞, 曹志东, 等. 基于 DEM 的地形曲率计算模型误差分析[J]. 测绘科学, 2006, 31(5): 50-53.
- [15] 李倩楠. 基于不同算法的 DEM 地面曲率提取的比較分析[J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2016, 37(5): 82-85.
- [16] 赵鹏, 张立朝, 张文诗, 等. 一种利用地形曲率提取地形特征线算法[J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(1): 13-17.
- [17] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [18] 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.
- [19] 周宏伟, 谢和平, KW A SN IEW SK IM A, 等. 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.