

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

南 希, 李爱农*, 边金虎, 张正健

(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要 :目前广泛应用的数字高程模型(DEM)包括 SRTM 和 ASTER GDEM,但在地形影响下,两类数据的误差分布并不均匀。本文选用 1:5 万地形图 DEM 及河流要素作为参照,在青藏高原东麓山区开展实验,分别采用“河流-河谷”位置偏移量与高程中误差来评价两类数据的平面精度与垂直精度,结果表明:(1)实验区内 SRTM3 存在向西南方向的水平位置偏移,平均偏移量为 127.8 m,ASTER GDEM 则以正西方向偏移为主,平均偏移量为 104.1 m,该区域 ASTER GDEM 的总体平面精度较好;(2)SRTM3 数据样本的绝对误差分布相对集中,高程中误差为 35.3 m,小于 ASTER GDEM 样本的高程中误差 50.2 m,总体垂直精度优于 ASTER GDEM;(3)在平均高程大于 4500 m 的高海拔区域,两类数据的中误差与高程值正相关,SRTM3 中误差随高程增速较慢,垂直精度较 ASTER GDEM 高;(4)两组数据垂直精度对坡度有较大依赖性,中误差随坡度近似指数曲线增长,在平缓区域 SRTM3 中误差小于 ASTER GDEM。本研究为该类数据在山区的选用及误差修正提供依据。

关键词 SRTM3; ASTER GDEM; 精度; 误差分布

DOI:10.3724/SP.J.1047.2015.00091

1 引言

目前,以 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)、ASTER GDEM(Advanced Space Borne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model)为代表的数字高程产品,在地貌认知、生态环境分析、遥感数据处理与反演、陆表过程建模与灾害防治等领域得到了广泛的应用^[1-6]。SRTM3 数据空间分辨率为 3",约合 90 m 栅格大小,全球范围标称垂直精度达 ± 17 m、标称平面精度约 20 m^[7];ASTER GDEM 空间分辨率为 1",约合 30 m 栅格大小,全球范围内标称垂直精度达 ± 20 m、标称平面精度约 30 m^[8]。

当前,高程产品质量分析常见的方法有:以 GPS 点或高精度 DTM 为参考,计算 SRTM、ASTER

GDEM 高程误差^[1-2,9-13];以地形剖面线、山脊线、山谷线的重合程度考察位置偏差^[12-13];采用视觉效果对比、等高线套合检查、坡度坡向分段统计等方法评价模拟精度^[12-15]。其中,平面精度与垂直精度是衡量数据可用性及可靠程度的关键。受山区地形、地表覆被类型、空洞插补算法等的影响,青藏高原周边 SRTM3 与 ASTER GDEM 的误差显著高于其他地区^[16],而目前面向典型山区尤其是青藏高原周边山区的相关研究较少,有必要开展具有地域针对性的探讨。本文以 1:5 万地形图 DEM 及水系数据为参照,在青藏高原东麓开展研究,对 SRTM3 与 ASTER GDEM 数据的质量进行定量化分析,以便于理解两种高程产品在山区的误差分布特征,为数据选用及误差修正提供依据。

收稿日期 2014-02-27;修回日期:2014-04-09.

基金项目 中国科学院“百人计划”择优支持项目(Y2R1130130);四川省“百人计划”项目;中国科学院成都山地所“一三五”方向性项目(SDS-135-1204-05)。

作者简介 南 希(1986-),男,研究实习员,主要从事 GIS 在地学分析与可视化中的应用研究。E-mail: nanxi@imde.ac.cn

*通讯作者:李爱农(1974-),男,研究员,博士生导师,研究方向为山地定量遥感及其应用研究。E-mail: ainongli@imde.ac.cn

2 实验区与数据

2.1 实验区概况

实验区为青藏高原东缘的岷江上游流域,介于 $31^{\circ}\text{N}\sim 33^{\circ}\text{N}$, $102^{\circ}\text{E}\sim 104^{\circ}\text{E}$ 之间,范围与松潘、黑水、理县、茂县及汶川5县行政辖区大致重合,总面积约 $2.4\times 10^4\text{ km}^2$ (图1(a))。该区域有丰富的森林和水资源,是成都平原及岷江中下游流域的生态屏障及水源地^[17]。实验区整体地势西高东低,海拔720~5689 m。青藏高原向东挤压,造就了研究区地形的快速变化,在东西向百余公里区间内最大高程差超过5 km,为全国少见。区内高山、高中山占较大比例,中深切河谷发育,地表平均起伏度在1000 m以上。该区域的地貌特征在青藏高原东麓具有典型性,适合开展地形数据质量检验。

2.2 数据与处理

实验采用1:5万地形图水系要素作平面位置参

照,采用1:5万DEM(记为DEM5)作为高程参照。水系要素从1:5万数字栅格地图(DRG)矢量化获取,得到的线状水系与ETM+影像叠加作精度检查与误差消除(图1(b))。DEM5来自国家1:5万数字高程模型数据库,栅格分辨率25 m。ASTER GDEM与SRTM3数据从NASA、CGIAR网站下载,并按照研究区范围做镶嵌与裁剪处理。河流要素及DEM5空间基准采用Gauss-Kruger(高斯-克吕格)投影下西安80大地坐标系第18带,高程值以1985国家高程基准为参考;ASTER GDEM与SRTM3数据均采用WGS84参考椭球的地理坐标系,高程值以EGM96水准模型为参考。为便于评价平面精度与垂直精度,采用七参数法将SRTM及GDEM数据从WGS84坐标转换到西安80大地坐标系,并依据EGM96水准面与1985国家高程基准点之间的垂直偏差^[18]完成系统差修正。

实验用正、反地形坡向变率算法^[19]分别提取了每类地形数据的山谷信息。经过多次试验,坡向变

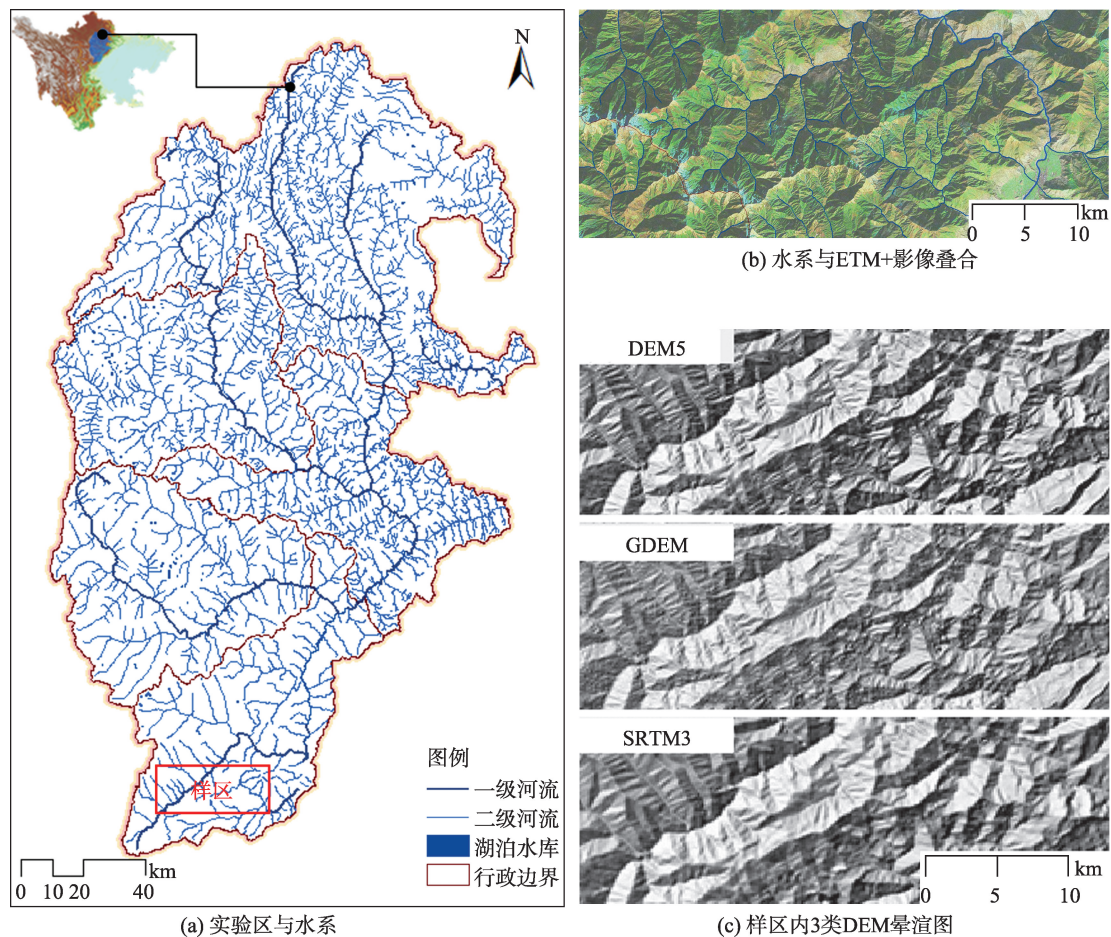


图1 实验区与数据

Fig. 1 Case study area and data sets

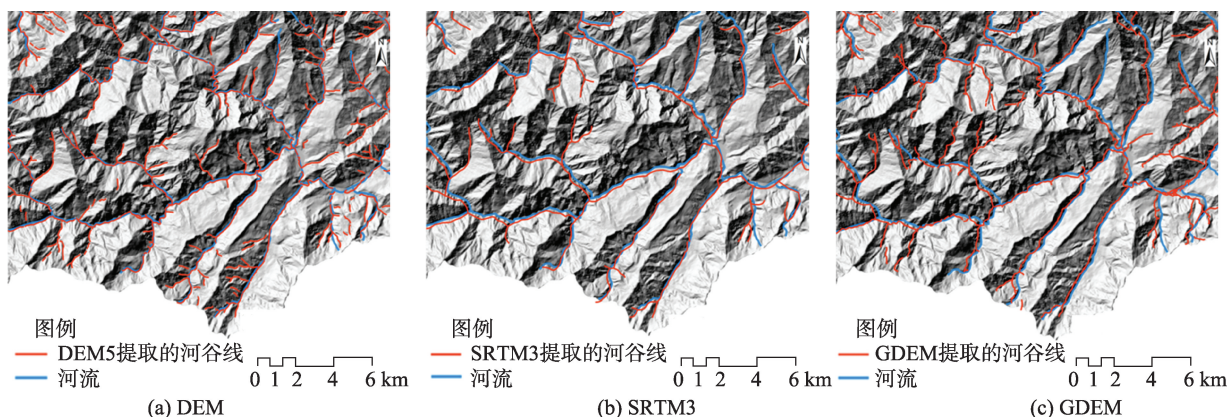


图2 地形数据提取的山谷线与河流叠合

Fig. 2 Overlap-add of river lines with ravine lines extracted from DEMs

率阈值取在[40,45]时,得到的沟谷栅格连通性较好且冗余较少。为避免冗余信息影响计算,对提取结果作了适当的清理并转换为山谷线要素。由图2可知,DEM5提取的山谷线与地形图河流要素重合较好,而SRTM3、GDEM提取的山谷线与河流线交织在一起,重合程度相对较差。

3 实验区数据精度分析方法

3.1 平面精度评价方法

受地形起伏、平台飞行轨道、传感器误差及数据处理算法等的影响,SRTM3与ASTER GDEM的平面精度存在较多不确定因素。不同DEM数据之间一般难以大量获取同名地物点,难以据此直接计算地形数据间的水平位置互差,需要另寻参照。实验区“V”形深切河谷广泛分布,谷底狭窄,存在常年性或季节性地表径流,按照地图缩编的特征,该区域河流线在一定比例尺范围内与山谷线在理论上是重合的。在具体操作中,受地形数据平面精度与模拟能力的影响,提取得到的山谷线与河流要素并不完全重合,二者交织形成细碎多边形(图3)。

一般地,在同一山地区域内,高程数据平面精度越低,山谷线偏离参照河流线越远,细碎多边形总面积增大;反之,山谷线靠近河流线,细碎多边形总面积减小。将山谷线偏离参照河流线的平均距离记为山谷线位置偏移(d),下文简称“偏移”。单一河流段的偏移值记为:

$$d = S/l = \sum_{i=1}^n s_i/l \quad (1)$$

式(1)中, S 为地形数据提取的山谷线与某河流

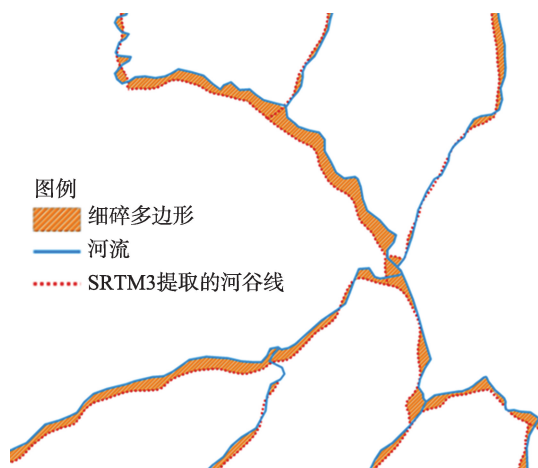


图3 河流线与山谷线围成的细碎多边形

Fig. 3 Fractal polygons made up with river lines and ravine lines

线段复合后所夹细碎多边形面积 s 的和; l 为该河流线段长度。对整个实验区,有总体偏移 Δ 为:

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{m} \sum d^2} \quad (2)$$

式(2)中, m 为成对的山谷线-河流线段数目; Δ 值反映了区域内山谷线偏离河流线的平均幅度。

3.2 垂直精度评价方法

平面精度一致的DEM之间,可以逐像元比较,为方便运算,在不减少数据信息量的情况下,将SRTM3与ASTER GDEM数据重采样为25 m栅格分辨率,与DEM5一致,插值方法选用最邻近像元法,使插值后的多数栅格保持原来的值。不同地形数据高程误差在空间上的分布并不均匀,其分异情况在2类受测数据与DEM5的高程互差上有所体现(图4)。

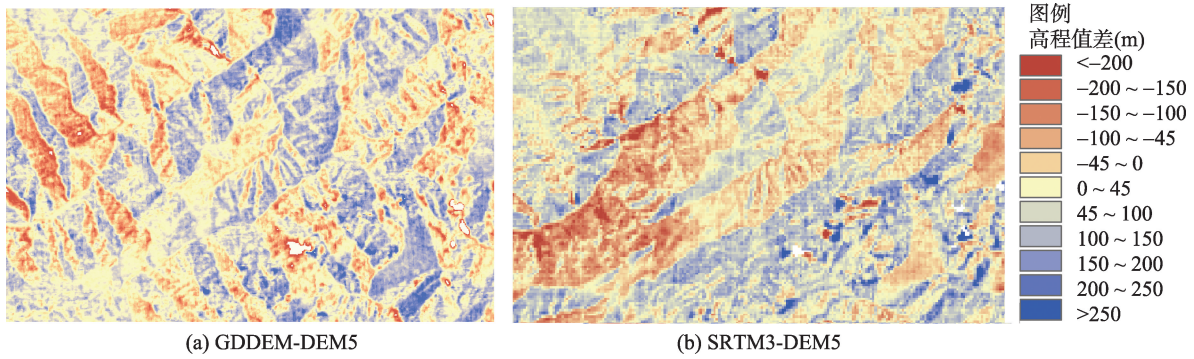


图4 ASTER GDEM,SRTM3与DEM5高程值差

Fig. 4 Altitude value differences

实验对互差结果做数值统计对比并采用中误差(RMSE)考察总体垂直精度,DEM的中误差反映高程记录值与真值的离散程度,其计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (z_i - z'_i)^2 \right) / n} \quad (3)$$

式(3)中, z_i 为参照组数据的高程值; z'_i 为对应栅格单元处受测地形数据的高程值; n 为参与计算的栅格总数。

4 实验区数据精度评价结果与分析

4.1 平面精度分析

实验按照提取沟谷、与河流线构造多边形、计算位置偏移量的步骤,分别考察 SRTM3、ASTER GDEM 及 DEM5 提取的山谷线相对于参照河流线

表1 相对于河流的偏移值

Tab. 1 Deviations from river line

	DEM5	SRTM3	GDEM
总体偏移 Δ (m)	46.5	127.8	104.1

的偏移,计算结果如表1所示。

参照组 DEM5 提取的山谷线总体偏移值为 46.5 m, 小于 ASTER GDEM 的 104.1 m 及 SRTM3 的 127.8 m。在实验区,GDEM 的总体平面精度优于 SRTM3,但二者均低于 DEM5。

对图2观察发现,山谷线偏移距离与河流流向相关,实验用 ArcGIS 10.0 的“Linear Direction Mean”工具提取各河段流向,按式(1)分别计算 SRTM3、GDEM 提取的山谷线与对应河段偏移值,并建立极坐标系,以河段流向为极角、河段偏移为极径进行标绘,结果如图5所示。

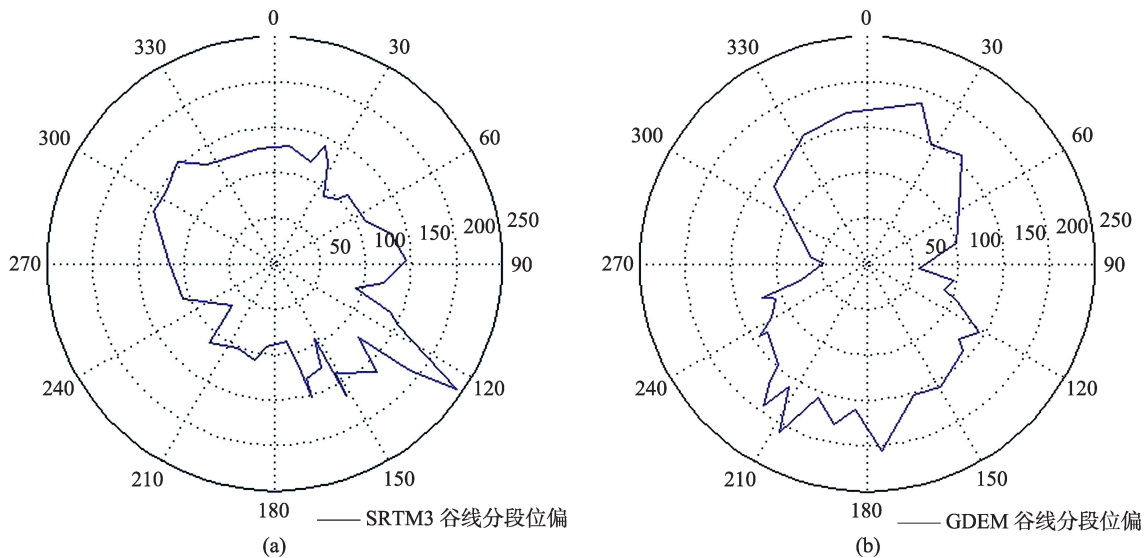


图5 偏移值随流向变化情况

Fig. 5 The offset value changes along with the flow direction

SRTM3 偏移极大值出现在 NW-SE 河流流向上, 即图 5(a) 上极角 $\theta=130^\circ$ 附近, 偏移极小值出现在 NE-SW 方向, 即 $\theta=230^\circ$ 附近。其余方向偏移值变化相对平稳, 南北向偏移在 92~135 m 内变化, 东西向偏移在 112~148 m 内变化。以 $\theta=130^\circ$ 所在直线为轴, SRTM3 偏移量具有一定的对称性, 结合图 2 山谷线位移方向可以推断, 相对于实验区河流线, SRTM3 在向南向西两个方向应各有 90~150 m 的独立偏移向量, 其余各方向偏移由二者合成, 当合成向量方向与河流流向的法方向一致时出现极大偏移, 当与河流流向共线时出现极小偏移。ASTER GDEM 偏移特征明显, 极大值出现在 N-S 河流流向上, 即图 5(b) 上极角 $\theta=180^\circ$ 附近, 偏移极小值出现在 E-W 方向, 即 $\theta=270^\circ$ 附近。南北向偏移量介于 170~209 m, 东西向偏移介于 48~57 m, 其余方向偏移值介于二者之间, 呈递变性。以 $\theta=0^\circ$ 所在直线为轴, ASTER GDEM 偏移量具有一定的对称性, 结合图 2 可推断 ASTER GDEM 在向西方向有不大于 210 m 的偏移向量, 其余各方向偏移值主要由此引起, 当河流流向为 N-S 时出现极大偏移, 当河流流向为 E-W 时出现极小偏移。

4.2 垂直精度分析

相关研究中的地形剖面对比实验^[12]及本文的山谷偏移计算均表明, 尽管 SRTM 与 ASTER GDEM 坐标系相同, 但二者本身的配准精度不同, 在开展垂直精度实验前, 参照山谷线偏移方向及偏移值对实验区 SRTM 及 GDEM 数据做了平移操作: SRTM 向南平移 92 m 并向西平移 112 m, GDEM 向西平移 170 m, 平移后重新提取山谷线并计算偏移 Δ 值, 此时 SRTM3、ASTER GDEM 的总偏移值 Δ 均小于 49 m,

接近参照组 DEM5 的平面精度水平, 基本满足地形数据间高程互差的要求。SRTM3、ASTER GDEM 分别与 DEM5 作减法运算, 得到相对于 DEM5 的高程误差分布, 以误差为 x 值、各误差区间内栅格数量为 y 值, 得到平面直角坐标系下误差分布曲线(图 6)及统计结果(表 2)。

两类地形数据的绝对误差均以 0 为中心呈现正态分布, 其中, SRTM3 的误差区间为 $[-298, 323]$, 高程误差绝对值均值 31.7 m; GDEM 高程误差区间为 $[-187, 205]$, 绝对误差均值 42.3 m。当绝对误差分别取 10、15、20、50、100 m 时, SRTM3 样本的栅格数累计百分比为 15.4%、23.8%、34.3%、68.9%、98.6%,

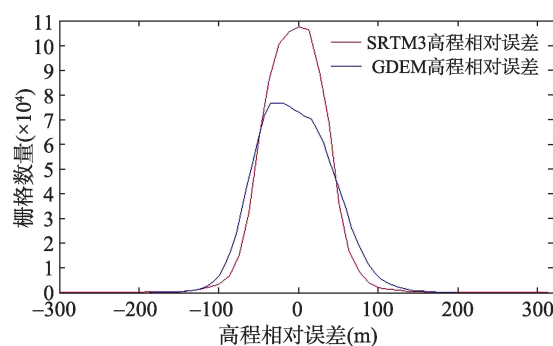


图6 SRTM3 与 ASTER GDEM 相对于 DEM5 误差分布
Fig. 6 Absolute error distributions of SRTM3 and ASTER GDEM

表2 误差统计

Tab. 2 Error statistics of the sample

数据样本	高程均值 (m)	绝对误差 均值(m)	绝对误差<20 m 的像元比例(%)	RMSE(m)
SRTM3	2834	31.7	34.3	35.3
ASTER GDEM	2813	42.3	24.0	50.2

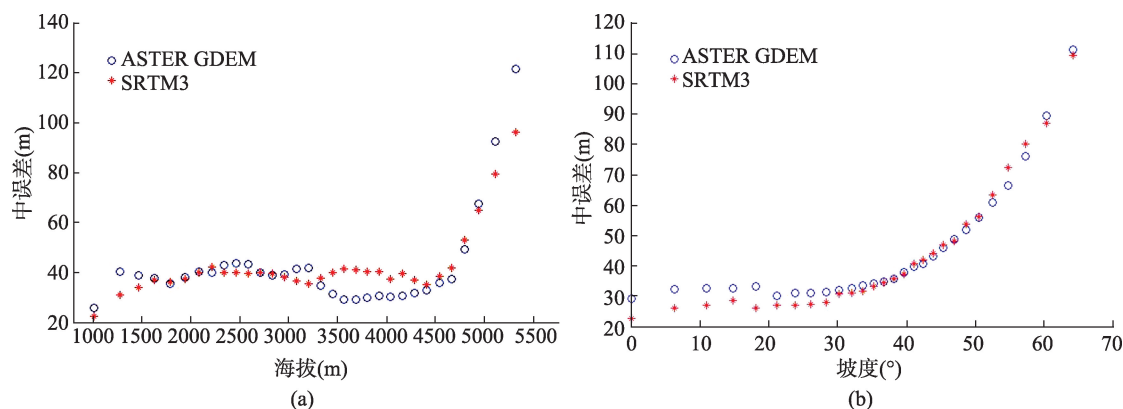


图7 中误差随高程与坡度的变化

Fig. 7 Distribution of RMSE with respect to the elevation and the slope

ASTER GDEM 的栅格数累计百分比为 10.7%、18.8%、24.0%、54.4%、94.2%，相比之下，SRTM3 的误差分布更为集中。依据式(3)计算得到 SRTM3 与 ASTER GDEM 数据的高程中误差分别为 35.3 m、50.2 m。相比之下，SRTM3 样本的绝对误差均值、栅格单元累计百分比、中误差等指标均优于 ASTER GDEM，整体垂直精度更高。

对比晕渲图(图1(c))及 DEM 互差结果(图4)，高程绝对误差在直观上与地表形态有一定的相关性，在不同高程、不同坡度上分别抽取多个子样区进行试验，发现两类数据中误差只在高海拔区域与高程正相关，而整体上与坡度正相关(图7)。

样本平均高程小于 4500 m 时，两类数据中误差值在 20 m 到 45 m 之间变化，与高程值没有明显相关性，说明在低海拔区域地表高程对 ASTER GDEM 及 SRTM3 的误差影响较小；子样本区平均高程大于 4500 m 时，两类数据中误差随高程增大而快速增大，尤其当高程大于 5000 m 时中误差超过了 70 m 显著高于低海拔地区，表明数据垂直精度在高海拔区域较低，相比之下 ASTER GDEM 的中误差值增速略大于 SRTM3，SRTM3 数据垂直精度相对较好。

从坡度采样结果来看，中误差值随平均坡度增大而增大，ASTER GDEM 与 SRTM3 垂直精度对坡度有较大依赖性。坡度小于 30° 时，RMSE 小于 35 m，增长较慢且有波动，ASTER GDEM 的中误差大于 SRTM3，SRTM3 垂直精度较高；坡度大于 30° 时，两类数据中误差随坡度近似指数曲线增长，从 34 m 快速增大至 118 m，垂直精度相接近且较低。

5 结论

本文结合山区地貌特征，计算以河流为参照的山谷线位置偏移，对 SRTM3 及 ASTER GDEM 平面精度作出定量分析；通过样本高程绝对误差及中误差计算，对受测地形数据的垂直精度作出定量比较。结果表明：

(1) 在实验区，SRTM3 的整体位置偏差约 127.8 m，平面精度不及 ASTER GDEM。SRTM3 在南方向及西方向存在一对大小接近的偏移向量，其大小介于 90~150 m；ASTER GDEM 偏移向量主要为正西方向，其模小于 210 m。

(2) 相对于参照数据，两组受测数据的绝对误差均以 0 为中心呈正态分布，其中 SRTM3 的绝对误差均值 31.7 m、ASTER GDEM 的绝对误差均值为 42.3 m，且 SRTM3 样本的误差分布更为集中；同时，SRTM3 的高程中误差为 35.3 m、ASTER GDEM 的高程中误差为 50.2 m；由此判断该区域内 SRTM3 整体垂直精度较高。

(3) SRTM3 及 ASTER GDEM 的垂直误差具有空间分异特征，在低海拔地区两类数据 RMSE 与高程无明显量值关系且 RMSE 值接近，在平均高程大于 4500 m 的高海拔区域两类数据 RMSE 与高程正相关，其中，SRTM3 的中误差增速较小且精度较好；两类数据垂直精度对坡度有较大依赖性，在坡度较小区域 SRTM3 垂直精度较高，随着坡度增大，中误差快速增大且值接近。

两组地形实验从水平与垂直 2 个方向对地形数据的误差开展分析，但对两类数据地形模拟能力及噪声情况未作探讨，实验过程中发现 SRTM3 受分辨率限制，其山谷线形态丢失了细节信息趋于平直，不及 GDEM 山谷线形态准确丰富。在地学分析中往往更注重地形分量的这种形态关联特征，而非特定点的采样精度，两类数据的模拟精度有待进一步讨论。此外，ASTER GDEM 用光学立体像对提取高程，特定区域的数据精度取决于覆盖该区域的像对数量^[11,15]，同时影像中的云雾及像对匹配错误都会引入误差^[6]；SRTM 用雷达干涉信息提取高程，成像过程受雷达阴影、回波滞后、镜面反射等的影响形成数据空洞，不同区域补洞数据及算法不同，误差分布也有所差异^[20]。实验考察了 RMSE 值随高程及坡度的变化情况，数据生产方式、山体坡向、地表覆被及数据空洞插补等的影响并未检验，影响山区 SRTM3 与 ASTER GDEM 数据质量的因素有待深入解析。

参考文献：

- [1] Wang W C, Yang X X, Yao T D. Evaluation of ASTER GDEM and SRTM and their suitability in hydraulic modelling of a glacial lake outburst flood in southeast Tibet [J]. Hydrol Process, 2012, 26: 213-225.
- [2] Frey H, Paul F. On the suitability of the SRTM DEM and ASTER GDEM for the compilation of topographic parameters in glacier inventories [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 18:

- 480-490.
- [3] Almeida-Filho R, Miranda F P. Mega capture of the Rio Negro and formation of the Anavilhanas Archipelago, central Amazônia, Brazil: Evidences in an SRTM digital elevation model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007,110(3):387-392.
- [4] Huggel C, Schneder D, Miranda P J, *et al.* Evaluation of ASTER and SRTM DEM data for lahar modeling: A case study on lahars from Popocatepetl Volcano, Mexico[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008, 17:99-110.
- [5] Kellndorfer J, Walder W, Pierce L, *et al.* Vegetation height estimation from shuttle radar topography mission and national elevation datasets[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004,93(3):339-358.
- [6] Bian J H, Li A N, Jin H A, *et al.* Auto-registration and orthorectification algorithm for the HJAB CCD images [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013,10(5):754-767.
- [7] Bamler R. The SRTM Mission: A world-wide 30m resolution DEM from SAR interferometry in 11 days [J]. *Photogrammetric Week*, 1999,47:145-153.
- [8] GISAT. ASTER GDEM Readme File [EB/OL]. <http://www.gisat.cz/content/en/products/digital-elevation-model/aster-gdem>, 2009.
- [9] Brown C G, Sarabandi J K, Pierce L E. Validation of the Shuttle Radar Topography Mission height data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005,43(8):1707-1715.
- [10] 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.
- [11] Hirt C, Filmer M, Featherstone W. Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2010,57(3):337-347.
- [12] 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.
- [13] 刘勇.中国西北部高山高原地区SRTM3数据质量评价[J].*兰州大学学报(自然科学版)*,2008,44(6):1-7.
- [14] 闫业超,张树文,岳书平.东北川岗地形区SRTM数据质量评价[J].*中国科学院研究生院学报*,2008,25(1):47-46.
- [15] Jacobsen K. Comparison of ASTER GDEMs with SRTM Height Models[C]. *Remote Sensing for Science, Education, and Natural and Cultural Heritage. 30th EARSeL symposium*, Paris, FR, May 31 - June 3, 2010:521-526.
- [16] Rodriguez E, Morris C S. An assessment of the SRTM topographic products[EB/OL]. <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/srtmbibliography.html>, 2007.
- [17] 李爱农,周万村,江晓波.遥感和GIS技术支持下的岷江上游15年土地利用/土地覆被动态变化研究[J].*水土保持学报*,2003,17(4):153-156.
- [18] 郭海荣,焦文海,杨元喜.1985国家高程基准与全球似大地水准面之间的系统差及其分布规律[J].*测绘学报*, 2004,33(2):100-104.
- [19] 汤国安,杨昕.ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程(第二版)[M].北京:科学出版社,2012:403-405.
- [20] Luedeling E, Siebert S, Buerkert A. Filling the voids in the SRTM elevation model - A TIN-based delta surface approach[J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007,62(4):283-294.

Comparison of the Accuracy between SRTM and ASTER GDEM over Typical Mountain Area: A Case Study in the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau

NAN Xi, LI Ainong*, BIAN Jinhu and ZHANG Zhengjian

(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: Digital elevation model (DEM) is one of the most important data format for geography research in mountainous areas. At present, the widely used digital elevation models include SRTM and ASTER GDEM. However, their relevant errors are not well distributed under the influence of different terrain types. For the accuracy analysis of these two types of data, this paper considers the 1:50 000 DEM and rivers as references to carry out experiments over the eastern Tibetan Plateau. The horizontal accuracy and vertical accuracy are evaluated respectively by using "river-ravine" deviation method and root mean square error method. The conclusions are drawn from this study as follows: (1) the average river-ravine deviation of SRTM3 is 127.8 m, of which the offset direction is southwest; while that of ASTER GDEM is 104.1 m, of which the offset direction is west; (2) absolute error distribution of SRTM3 is relatively concentrated, where the elevation error is 35.3 m, which is less than ASTER GDEM elevation error of 50.2 m. The overall vertical accuracy of SRTM3 is better than ASTER GDEM; (3) at high altitudes over the average elevation of 4500 m, there is a positive correlation between the error and the elevation, in which the SRTM3 error shows slower growth and higher vertical accuracy compared with ASTER GDEM; (4) the vertical accuracy of the two types obviously depends on the slope, with which the error approximately indicates an exponential curve growth, and the error of SRTM3 in the flat area is less than that of ASTER GDEM. This study helps to understand the error distribution of the two data sets in mountain areas as well as to provide a foundation for further studies in data selection and error correction.

Key words: SRTM3; ASTER GDEM; accuracy

*Corresponding author: LI Ainong, E-mail: ainongli@imde.ac.cn