

引用格式: 孟伟,李润奎,段峥,等.基于地貌特征的数字高程模型融合方法[J].地球信息科学学报,2018,20(7):895-905. [Meng W, Li R K, Duan Z, et al. Digital elevation model fusion by landform characteristics[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(7):895-905.] DOI: 10.12082/dqxxkx.2018.170554

基于地貌特征的数字高程模型融合方法

孟伟¹,李润奎^{1,2},段峥³,徐江⁴,宋现锋^{1,2*}

1. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 慕尼黑工业大学土木、地学与环境工程系, 慕尼黑 80333; 4. 广西融科科技有限公司, 柳州 545000

Digital Elevation Model Fusion by Landform Characteristics

MENG Wei¹, LI Runkui^{1,2}, DUAN Zheng³, XU Jiang⁴, SONG Xianfeng^{1,2*}

1. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Department of Civil, Geo and Environmental Engineering, Technical University of Munich, Munich 80333, Germany; 4. Guangxi Rongke Technology Company Limited, Liuzhou 545000, China

Abstract: The digital elevation model (DEM) is considered as a source of vital spatial information and is widely used in many fields. The ASTER GDEM and SRTM provide almost global coverage and offer practical elevation data for geography research. However, due to the differences of remote sensing mechanism, GDEM and SRTM datasets present different accuracies on same landform units. A novel elevation data fusion approach is proposed in this paper, which eliminates the impact of landform characteristics on two DEMs and significantly improves the quality of fused DEM. This method focuses on two steps, geo-referencing and elevation fusion. An objective function of errors representing the summary of horizontal shifts between two DEMs by referring to stream link pair is first proposed, and correspondingly a multilevel grid search method is suggested to calculate the optimal horizontal offsets between DEMs. Two geo-referenced DEMs are then fused using regression models over different landform units and moreover the elevations nearby the boundaries of two units are specifically treated using a weighed non-linear regression method. This approach was tested in the area of northern Huairou using a 1: 50 000 topographic map. The statistics show that: (1) the RMSE of fused DEM decreases significantly in all landform units, and the representation of terrain is more accurate than GDEM and SRTM; (2) The difference of the elevation points between fused DEM and referenced topographic map also illustrates a normal distribution, which is obviously different from the asymmetric multi-peak distributions of two raw DEMs, indicating that the topographic effects have been effectively eliminated; (3) The accuracy of fused DEM is superior to that of GDEM and SRTM under different slope ranges, meanwhile, the influence of slope factor on the elevation accuracy of DEM is obviously reduced after fusion; (4) The RMSEs of GDEM and SRTM vary greatly with different aspects, while the RMSE of fused DEM keeps homogenous in almost all aspects, and the elevation accuracy of the fused DEM is also significantly improved in comparison with GDEM and SRTM.

收稿日期 2017-11-21;修回日期:2018-02-06.

基金项目 广西科技重大专项项目(桂科AA17202033);国家重点研发计划项目(2017YFB0503702);国家重点研发计划项目(2017YFB-0503605)。[**Foundation items:** Guangxi Science and Technology Major Project, No.GK-AA17202033; National Key Research and Development Program of China, No.2017YFB0503702; National Key Research and Development Program of China, No.2017YFB0503605.]

作者简介 孟伟(1994-),男,硕士生,研究方向为空间数据挖掘。E-mail:18811152566@163.com

*通讯作者 宋现锋(1969-),男,博士,教授,研究方向为空间数据挖掘。E-mail:xfsong@ucas.ac.cn

Key words: DEM; river; landform; geo-reference; elevation data fusion

***Corresponding author:** SONG Xianfeng, E-mail: xfsong@ucas.ac.cn

摘要: 数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是一种至关重要的空间信息,广泛应用于各行各业。其中,ASTER GDEM与SRTM几乎覆盖了全球陆域,为地学研究提供了非常实用的高程数据支撑,但是由于二者传感器采集数据原理的不同,使得高程数据在不同地貌条件下的高程精度亦存在程度不一的误差。本文提出了一种新型的基于地貌特征的DEM融合方法,使得融合GDEM与SRTM后的DEM数据,消除了地貌特征的影响,显著地提高了DEM质量。该方法主要分为地理配准和高程融合2个步骤:①基于河流线对等线性地貌特征的位置数据,构建了GDEM与SRTM的水平偏移相关的误差评价函数,采用多级网格搜索法求得DEM间的水平偏移距离,实现对DEM的配准;②按照DEM高程值在不同地貌单元及边界线附近的高程变化特征,建立地貌分区的高程融合模型来融合两种地理配准后的DEM高程,尤其是实现了地貌单元边界线附近的高程平滑过渡。本文以怀柔北部地区为实验区,以1:5万地形图为参考,对2种DEM数据进行融合,统计结果表明:①融合DEM在各地貌单元的误差均显著下降,地形表达较之融合前更加精确;②高程差呈现正态分布,明显区别于融合前DEM不对称的多峰分布形态,说明地貌影响被有效地剔除;③GDEM和SRTM数据的精度对坡度有较大依赖性,融合后DEM的精度在不同坡度范围下均优于GDEM和SRTM,显著降低了融合前DEM对坡度的依赖程度;④在不同坡向下,GDEM和SRTM的RMSE取值波动较大,融合DEM的RMSE取值在各方向表现稳定,高程精度较GDEM和SRTM有显著提高。

关键词: 数字高程模型;河流;地貌单元;地理配准;高程融合

1 引言

全球数字高程模型 ASTER GDEM 和 SRTM DEM 是 2 种广泛使用的开放数据。其中,光学 GDEM 分辨率较高,但云层覆盖、薄雾遮挡等天气因素对其数据精度造成较大影响;雷达 SRTM 穿透能力强、受天气影响较小,但也存在雷达阴影、镜面反射、相位解缠误差等问题^[1]。因此,整合二者优势生成更高精度、更可靠的 DEM,对其在地貌学、水文模拟、冰川变化等领域的应用具有重要的参考价值^[2]。

目前,关于 GDEM 和 SRTM 数据精度的研究已经取得不少成果,主要通过和高精度的高程控制点或高精度 DEM 数据进行比较,实现对 DEM 的精度评价。如与 GPS 实测高程点^[3]、地形图提取的高程控制点^[4]、ICESat 雷达测高数据^[5-6]、大比例尺地形图生成的 DEM^[7]进行对比,或利用各种统计方法分析 DEM 精度与地形参数、植被覆盖度等因素之间的关系^[8-10];研究内容多集中在高程误差评价方面,评估指标常采用中误差、平均误差、标准差等^[7,11],以及地形地貌特征对 DEM 精度的影响^[4,6]。

由于 GDEM 与 SRTM 数据的获取方式与处理方法的差别,2 种高程模型在同一地区表现出不同的数据精度。相关研究表明,两种数据呈现出的误差分布与地形地貌特征以及地表覆盖类型等因素密切相关^[6,8,12-15]。基于 GDEM 和 SRTM 的数据特征,常见的 DEM 融合方法,如加权平均法^[16-17]、稀疏

表示法^[18]、快速傅里叶变换^[19]等,尽管融合后 DEM 的精度有所提高,但是由于融合方法缺乏对地形、地貌、植被等因素的考虑,限制了融合 DEM 质量的更高提升,地表形态变化因素对 DEM 融合的影响仍是一个亟待解决的问题^[20]。

为了提高 GDEM 与 SRTM 的融合质量,本文利用 DEM 提取的地貌特征,从 DEM 的地理配准和按照地貌单元融合高程 2 个重要环节进行建模分析,尤其是对地貌单元之间过渡区高程融合建模,显著地降低了 2 种 DEM 融合过程的误差。采用地形图的参考高程数据进行验证,结果表明融合后的 DEM 结果有效地剔除了地貌对 2 种 DEM 高程精度的影响,提高了融合质量。

2 研究方法

本文提出了基于地貌特征的 DEM 融合方法,主要解决了融合过程中的 2 个难点问题:①针对缺乏地物标识(同名点)的 DEM 灰度图像,利用河流线对等线性地貌要素进行 DEM 的地理配准,提高了 DEM 水平方向的配准精度;②针对地貌单元边界附近位置的高程受邻近不同类型单元的影响问题,提出了面向地貌单元过渡区的高程融合优化模型方法,而不是简单地按地貌单元的特有参数融合,从而降低地表形态变化对融合高程质量的影响。以 GDEM 和 SRTM 为例,基于地貌特征的 DEM 融合方法流程如图 1 所示。

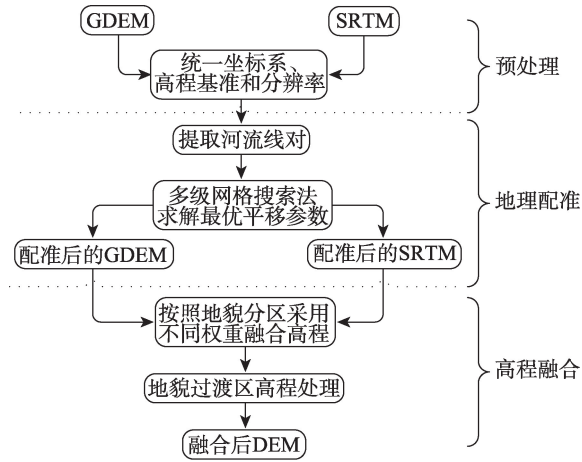


图1 GDEM和SRTM数据融合流程图

Fig. 1 Flowchart of GDEM and SRTM data fusion

2.1 基于线性地貌特征的地理标准

GDEM与SRTM之间存在着水平方向的偏移^[21-22],甚至在局部地区还比较严重,因此融合不同来源的DEM前必须对其进行地理配准^[23]。地理配准需要同名点(或控制点)用于几何变换建模。DEM是表示地形起伏的灰度图像,没有遥感图像上常见的道路交点、桥梁、建筑物等特征点。Karkee等^[24]利用DEM提取的河网交叉点、流域边界线交叉点等作为控制点(同名点)匹配DEM,但是DEM本身存在的高程误差,尤其是在平原地区,DEM的水流方向深受高程精度影响,使得提取出的河流或分水岭等交叉点与真实位置往往存在较大的偏差。

本文提出了一种基于河流线对的DEM地理配准算法。河流线对(同名线对)是指在按照同一流域面积阈值从2个DEM中所提取水系制作的线性地貌特征图上,将2个图中位于同一位置的河段作为同名线。河流线对避免了同名点数量少、分布不均匀的问题,有效地削弱了个别粗差点带来的位置偏差,提高了匹配可靠性。另外,注意在平原地区剔除差异显著的线对。该算法旨在求解一组待变换DEM的水平偏移值使得各河流线对的误差和最小,具体如下:

假设 p_{ij} 是第 i 条同名线上的第 j 个点, p'_{ij} 为待匹配同名线上的对应点, p'_{ij} 是通过最邻近距离法获得的,以各同名线点对之间的距离平方和的累计值最小为原则,构建目标函数:

$$\text{minimize } f(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} \|p_{ij} - (p'_{ij} + t)\|^2 \quad (1)$$

式中: $t = [t_x, t_y]^T$ 为 x 轴、 y 轴的平移向量; N 为用于匹配的河流线对的数目; M_i 表示第 i 条线对包含的点数。

2.2 基于地貌单元的高程融合

GDEM与SRTM的高程精度在不同地区随地形、地貌单元的变化存在较大的差异。为此在DEM融合时,应避免简单地将DEM数据做整体地融合,需要考虑不同地区的地形、地貌的影响,按照地貌分区采用不同权重进行高程融合^[17]。本文对地理配准后的GDEM与SRTM按照地貌单元类型分别进行高程融合,采用了多元线性回归模型,其高程值的回归公式如下:

$$h = a_0 + a_1 h_1 + a_2 h_2 \quad (2)$$

式中: h_1 、 h_2 分别GDEM、SRTM的高程值; h 为融合后DEM的高程预测值; a_0 、 a_1 、 a_2 为回归系数。不同类型地貌单元内的回归系数取值不同。考虑到同一地区的GDEM和SRTM高程值存在着共线性^[25],统计各地貌分区的方差膨胀因子已经远超10,因此本文采用了岭回归的方法计算回归系数^[26],解决存在的共线性问题。

DEM高程值通常是在两类地貌单元之间平滑过渡的,如果在地貌分界线两侧采用截然不同的两组回归模型参数(式(2)),容易导致融合的高程值在分界线两侧产生较大的突变。针对这个问题,本文提出了一个地貌过渡区的概念,在地貌分界线附近的高程值,受两类地貌单元的影响随着距离变化此消彼长,直到过渡区边缘处完全消失。地貌缓冲区内高程值的估算公式如下:

$$h = \alpha(\Delta d) h_A + (1 - \alpha(\Delta d)) h_B \quad (3)$$

$$\alpha(d) = \begin{cases} \left[1 - \left(\lambda \frac{\Delta d}{b}\right)^2\right]^2, & 0 \leq \Delta d \leq b \\ 0, & \Delta d < 0 \text{ 或 } \Delta d > b \end{cases} \quad (4)$$

$$b = b_1 + b_2 \quad (5)$$

$$\Delta d = b_1 - d \quad (6)$$

式中: h_A 、 h_B 分别为地貌单元A和地貌单元B对应模型的高程预测值; $\alpha(d)$ 为 h_A 的权重函数,采用bi-square函数表示; d 是待处理点到地貌边界线的最短距离,A侧为正值、B侧为负值; Δd 是待处理点到地貌A侧过渡区边界的距离; b 为权重函数的带宽,这里表示缓冲区宽度,控制着权重函数的衰减速度^[27]; b_1 、 b_2 分别为地貌单元A、B两侧的缓冲区宽度; λ 为调整因子,用于调节距离对权重的影响,缺省值为1。

2.3 精度评价

DEM精度评价方法主要有检查点法、剖面法、等高线套和分析法等^[14,25]。本文以从地形图等高线解译的采样点高程作为高程真值,采用检查点法对融合前后DEM数据的垂直精度进行评价,具体评估统计量如下:

$$\text{平均误差: } \mu = \frac{\sum (h'_i - h_i)}{n} \quad (7)$$

$$\text{均方根误差: } RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h'_i)^2}{n}} \quad (8)$$

$$\text{平均绝对值误差: } MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |h_i - h'_i|}{n} \quad (9)$$

式中: h_i 为控制点高程值; h'_i 为对应点在DEM上的高程值; n 为用于检查的样本点个数。平均误差 μ 是以样本点高程为真实高程,计算DEM高程与样本点高程差的平均值,反映了DEM的系统误差。均方根误差 RMSE 是衡量DEM数据精度的常用指标,描述了DEM与真实高程的离散程度。平均绝对值误差能够避免平均误差计算时正负相抵的情况,反映了误差的绝对大小。

3 研究区与数据源

本文所选研究区为怀柔北部地区,经度范围 $115^{\circ}15' \sim 117^{\circ} E$, 纬度范围 $40^{\circ}10' \sim 40^{\circ}40' N$ 之间,海拔范围 $28 \sim 1510 m$ 。该区地貌类型较为复杂,中部和南部地势平坦,西部、北部地势较高,多为丘陵和中低山脉,山脊、山谷线性地貌特征明显(图2)。

ASTER GDEM(v2)和SRTM数据(v4)来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),为UTM(WGS-84球体)投影坐标系、EGM96高程基准。为便于DEM融合与精度评价,将SRTM重采样为30 m分辨率,同时采用基于典型位置相似度的模糊推理方法,将研究区划分为山脊、坡肩、背坡、坡脚、沟谷和平原6种地貌单元^[28],如图3所示。此外,以1:5万地形图为参照数据,其精度满足1993年《工程测量规范》,按照分层策略法在各地貌单元随机生成了1100个样本点并根据等高线人工解译出高程值,同时还数字化了该区的河流水系(图2)。地形图为1954北京坐标系、1956黄海高程基准,各数据集一并转为UTM系统和EGM96高程基准。

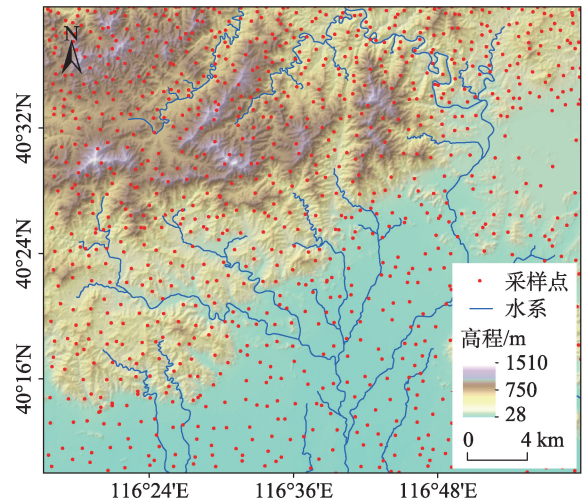


图2 怀柔北部地区的地面高程、样本点和水系
Fig. 2 DEM, elevation points and stream networks in northern Huairou

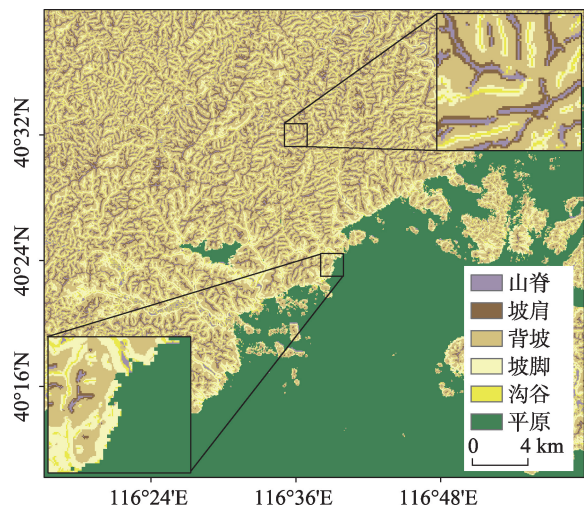


图3 怀柔北部地区的地貌类型

Fig. 3 Landform classification map in northern Huairou

4 结果分析

4.1 精度评价DEM的水平偏移

(1) GDEM、SRTM的水平偏移量

基于河流线对等线状地貌特征的地理配准方法的目标函数难以直接解算,本文采用了多级网格搜索法间接求解。首先,将待搜索的平移参数 $t_x \in [t_x^{\min}, t_x^{\max}]$, $t_y \in [t_y^{\min}, t_y^{\max}]$ 在一定区间范围内按一定间隔划分为较为稀疏的网格点,通过逐一比较各网格点的目标函数值,获得该级格网下的最优平移参数。然后,逐步缩小搜索范围和搜索步距,重复上述过程,直到获得最优参数位置。由一级格网的

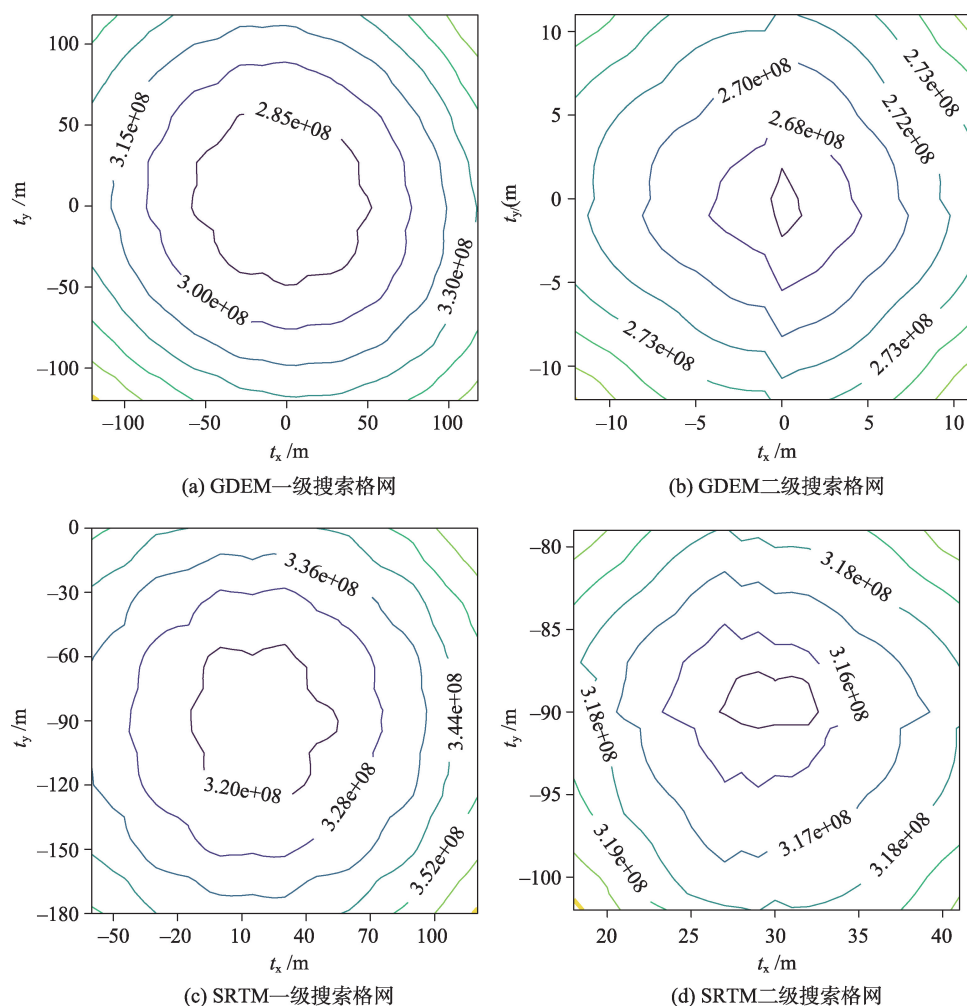


图4 GDEM、SRTM的河流线对误差累计和等值线图

Fig. 4 Error accumulation contour of river line pairs of GDEM and SRTM

目标函数等值线图(图4)可看出,GDEM和SRTM最优平移参数所在的大致区间,减小区间范围和步距重新搜索后,2种DEM的配准算法的目标函数均在二级网格处获得了最低误差值。其中,GDEM相对于参照地形图,向北偏移1 m,SRTM则向西偏移30 m,向北偏移90 m。

同其他DEM配准实验相比,Varga等^[3]在巴尔干半岛西北部的实验发现,GDEM相对于基准点向北水平偏移48 m、向东12 m,SRTM不存在偏移;

Mukherjee等^[14]以Cartosat DEM为参照,亦发现在北方向和东方向上,GDEM平移60 m和40 m,SRTM平移250 m和200 m。2种DEM在本地区的水平偏移都比较小。

(2)河流线对等线状地貌较之河流交叉点在地理配准中的优势

表1以河流线对和河流交叉点分别作为控制点对GDEM和SRTM进行地理配准,计算配准后所有河流交叉点到地形图河流交叉点之间的平均距

表1 DEM配准前后的河流交叉点的距离

Tab. 1 Average distances between pour points before and after geo-referencing

| DEM类型 | 配准前/m | | 配准后/m | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 河流线对法 | | | 交叉点法 | | | |
| | 总体 | 山区 | 平原 | 总体 | 山区 | 平原 | 总体 | 山区 | 平原 |
| GDEM | 129.05 | 104.31 | 203.97 | 129.02 | 104.27 | 203.96 | 160.18 | 103.21 | 236.81 |
| SRTM | 161.28 | 129.17 | 197.11 | 137.93 | 107.05 | 194.71 | 168.45 | 132.05 | 202.71 |

离。结果表明,采用河流线对法, SRTM水平精度提高约30 m, GDEM精度较高、没有大幅提升;传统的基于河流交叉点的DEM配准结果水平精度较配准前反而下降,这是由于配准方法精度依赖于所选控制点的质量和空间分布位置。受DEM高程误差的影响, GDEM、SRTM和地形图上的河流交叉点之间存在着程度不一的水平偏差,存在较多的粗差点,尤其是在平原地区,无论是河流还是交叉点偏移更为严重(图5),这导致研究区内水平精度较高的河流交叉点数量较少,且分布不均匀,无法保证DEM的整体配准精度。而河流线对法能够引入大

量的同名线状地貌,降低了个别粗差点对配准结果的影响,能够显著地提高DEM的地理配准精度。

(3) GDEM与SRTM在配准前后的高程差变化

利用河流线对法实现DEM的地理配准后,将GDEM与SRTM逐像元做差,得到高程互差结果(图6)。从图中可以看出,配准前后的DEM高程差图在空间分布上具有明显的差异:配准前DEM高程互差值波动幅度大,波及范围也非常广,尤其在地形复杂的山区,由于高程起伏变化剧烈,2个DEM的水平位置差异对高程值影响表现的异常显著;而配准后的DEM高程互差值变化幅度和分布

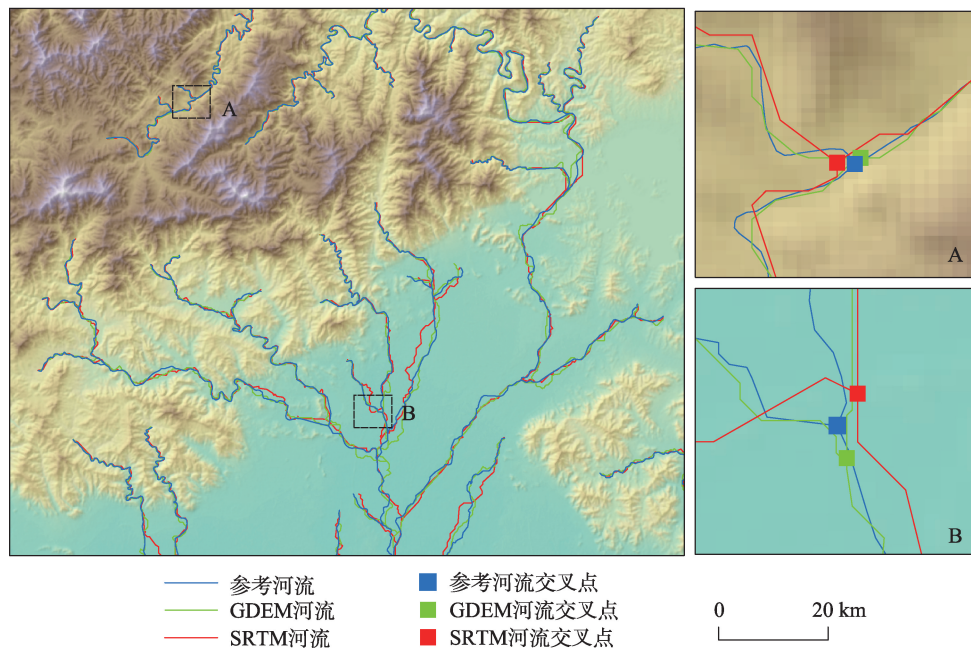


图5 河流交叉点(汇流点)的水平偏差图
Fig. 5 Pour points in stream networks

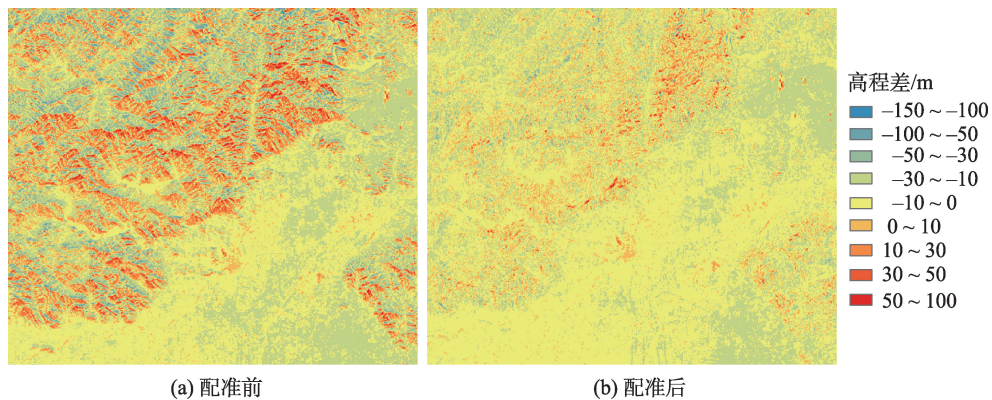


图6 GDEM与SRTM高程差
Fig. 6 Elevation difference between GDEM and SRTM

范围明显减小,因水平位置偏差变小,两者高程值趋向吻合,不但平原地区高程差变化变小,山区也显著降低,但仍大于平原地区。

4.2 精度评价 GDEM 与 SRTM 的高程整合

(1) DEM 值随不同类型地貌单元的变化特征

研究区 1100 个高程样本点分属 6 种地貌单元,分别统计 GDEM、SRTM 与这些高程样本点的高程差,绘制高程差散点图、直方图,并采用核密度函数获得核密度平滑曲线,如图 7 所示。其中, Δh_1 、 Δh_2 分别为 GDEM、SRTM 与样点的高程差,由图 7 可知,2 个 DEM 的直方图或核密度曲线均呈现出 3 个明显的峰值,将地貌单元分为 3 组,对应的散点也呈现为 3 个团状聚类。

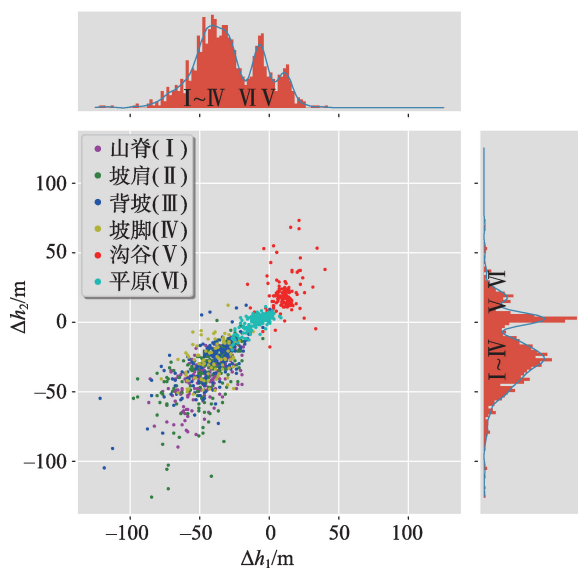


图 7 GDEM、SRTM 与高程样本点的高程差散点分类图

Fig. 7 Classification of sample points by scatter plots

组 1 为山脊(I)、坡肩(II)、背坡(III)和坡脚(IV),4 种地貌的高程差绝大多数呈现为负值,表明 GDEM、SRTM 所测高程均低于实际高程值;组 2 为沟谷地貌(V),GDEM、SRTM 所测高程值均偏高;组 3 为平原地貌(VI),SRTM 高程误差比较低、GDEM 所测高程整体偏低。GDEM 和 SRTM 的高程差直方图呈现 3 个峰值,主要由 I-IV、VI 和 V 共 3 类点组成。不同地貌单元对应的数字编号见表 2。

统计 GDEM、SRTM 在不同地貌单元的高程差中位数(表 2)。其中,GDEM 在 I-IV 地区位于 $-42.68 \sim -39.84$ m, SRTM 位于 $-35.18 \sim -26.68$ m; GDEM 和 SRTM 在 V 地区的高程差中位数为 9.68 m 和 15.68 m;在 VI 地区 GDEM 偏低 8.68 m、SRTM

表 2 不同地貌单元的 DEM 高程差中位数

Tab. 2 Median of DEM elevation differences in landform units

| 高程差 中位数/m | 山脊 (I) | 坡肩 (II) | 背坡 (III) | 坡脚 (IV) | 沟谷 (V) | 平原 (VI) |
|--------------|-----------|------------|-------------|------------|-----------|------------|
| GDEM | -42.68 | -40.68 | -38.68 | -39.84 | 9.68 | -8.68 |
| SRTM | -35.18 | -31.34 | -25.68 | -26.68 | 15.68 | 0.32 |

仅稍高参考高程 0.32 m。GDEM 和 SRTM 在山谷的高程值都明显偏高,除了 DEM 数据采集方式以及生产方法,可能还受到如下影响:① 通常山谷形状狭窄、呈长条状,尤其是 V 型山谷,DEM 与地形图只要存在稍微水平偏移,谷底样本点的采样高程就有较大变化;② 山谷一般湿度较大、温度较高,利于树木等植被生长,DEM 高程测量受到了植被影响。

与其他实验数据相比,Hu 等^[13]在湖北地区的实验表明,发现 SRTM 与 GDEM 与在平原地区的高程差均值分别为 2.6 m 和 2.9 m,在丘陵地区高程差均值为 2.6 m 和 -0.4 m,在山区高程差均值为 1.1 m 和 4.7 m。Zhao 等^[4]也发现在黄土高原区域 GDEM 和 SRTM 高程均值分别低于控制点高程均值 0.25 m 和 0.75 m;在华北平原 GDEM、SRTM 高程均值分别比控制点高程均值低 6.49 m 和 1.59 m。由此看出,2 种 DEM 高程的变化在不同地区呈现不同的特征,应用需要视研究区的实际情况而定。

(2) 地貌过渡区边界的确定

利用分属三大类地貌单元的 1100 个高程样本点,以两种 DEM 高程为自变量、以样本点实际高程为因变量,构建线性回归模型,通过最小二乘法获得回归方程的系数(表 3)。表 3 中 a_0 代表常数项, a_1 、 a_2 分别代表 GDEM 和 SRTM 高程的系数。

表 3 融合 DEM 的回归方程参数

Tab. 3 Regression equation parameters of fused DEM

| 地貌分类 | a_0 | a_1 | a_2 |
|-----------|---------|--------|--------|
| 组 1(I-IV) | 28.6760 | 0.4984 | 0.5277 |
| 组 2(V) | -8.4269 | 0.6537 | 0.3269 |
| 组 3(VI) | 0.7575 | 0.3109 | 0.7557 |

研究区的地貌过渡区存在 3 种情况:组 1(I-IV)与组 2(V)、组 1 与组 3(VI)、组 2(V)与组 3(VI)。本文采用网格搜索法遍历求解地貌边界线两侧的最优宽度值 b_1 与 b_2 ,构成地貌过渡区。该算法基本思路是将待搜索宽度在其取值范围内按一定间距(如取像元分辨率 30 m 为搜索步距)划分

网格,逐一计算各个网格点对应的融合 DEM 均方根误差,从中找出使融合后 DEM 均方根误差最小的那组宽度值(表4)。

表4 高程缓冲区宽度(m)

Tab. 4 Buffer size nearby landform boundaries

| 高程缓冲区(A-B) | A侧缓冲宽度 b_1 | B侧缓冲宽度 b_2 |
|------------|--------------|--------------|
| 组1-组2 | 90 | 0 |
| 组1-组3 | 390 | 510 |
| 组2-组3 | 0 | 60 |

面向地貌缓冲区的高程融合处理,实现了高程预测值在2种地貌之间的平滑过渡。表4中组3为沟谷地貌(V),不存在缓冲范围,这是因为沟谷呈狭窄的条状分布,宽度仅有1~2个像元。山区与平原的交界处的缓冲范围最为明显,平原侧缓冲范围约17个像元,大于山区侧的13个像元。

(3)融合DEM的精度评估

DEM之间的高程精度对比,是以地形图的高程采样点作为参照数据的。利用地理配准后的单一数据源与参考高程做回归获得的校正后的高程值,与2种数据源融合后的DEM进行对比,并统计1100个样本点的DEM高程值与高程参考值的均方根误差、高程差均值以及高程平均绝对值误差,分别获得表5~7。无论是均方根误差、高程差均值还是平均绝对值误差,2种数据源融合后的DEM在各类地貌单元的误差指标都显著小于融合前的

表5 DEM均方根误差(m)

Tab. 5 RMSE of DEMs

| | DEM类型 | 整个地区 | 地貌分组1(I-IV) | 地貌分组2(V) | 地貌分组3(VI) |
|-----|-----------|-------|-------------|----------|-----------|
| 融合前 | GDEM | 40.89 | 44.96 | 19.35 | 13.84 |
| | SRTM | 34.64 | 38.64 | 26.65 | 7.59 |
| 回归后 | GDEM | 18.38 | 17.13 | 45.01 | 10.39 |
| | SRTM | 20.44 | 19.15 | 51.94 | 8.43 |
| 融合后 | GDEM+SRTM | 14.74 | 16.25 | 17.69 | 7.54 |

表6 DEM高程差均值(m)

Tab. 6 Mean of the differences between DEMs and referenced samples

| | DEM类型 | 整个地区 | 地貌分组1(I-IV) | 地貌分组2(V) | 地貌分组3(VI) |
|-----|-----------|--------|-------------|----------|-----------|
| 融合前 | GDEM | -35.33 | -42.28 | 10.05 | -10.76 |
| | SRTM | -26.73 | -34.38 | 17.68 | -1.29 |
| 回归后 | GDEM | -0.57 | -4.38 | 37.57 | 6.58 |
| | SRTM | -0.94 | -5.12 | 43.52 | 6.28 |
| 融合后 | GDEM+SRTM | -1.56 | -1.67 | 1.75 | -0.87 |

表7 DEM高程平均绝对值误差(m)

Tab. 7 Mean absolute error of DEMs and referenced samples

| | DEM类型 | 整个地区 | 地貌分组1(I-IV) | 地貌分组2(V) | 地貌分组3(VI) |
|-----|-----------|-------|-------------|----------|-----------|
| 融合前 | GDEM | 36.26 | 42.35 | 13.97 | 9.28 |
| | SRTM | 28.62 | 33.49 | 21.14 | 4.04 |
| 回归后 | GDEM | 13.75 | 13.39 | 38.64 | 9.07 |
| | SRTM | 14.23 | 14.26 | 44.22 | 7.68 |
| 融合后 | GDEM+SRTM | 10.19 | 11.32 | 12.24 | 3.91 |

GDEM和SRTM,也明显小于回归后的单一数据源。其中,利用单一数据源得到的DEM总体精度较融合前的GDEM和SRTM有显著提升,但在各地貌单元的精度波动很大,这间接说明了地貌特征对两种DEM高程值的影响,并且其高程差均值在全区优于融合后DEM,这是将各地貌单元正负误差相抵消的缘故,实际上融合后DEM误差在各地貌单元均大幅小于单一数据源。融合前的SRTM与GDEM在山坡和沟谷的高程精度远低于平原区的高程精度,但二者融合后的DEM在各地貌单元的高程精度彼此基本相当。

对融合前的GDEM、SRTM和融合后的DEM做高程差指标的直方图(图8),统计结果显示GDEM和SRTM的高程差直方图呈现3个峰值且图形不对称,依次对应着3个地貌分组大类,而融合后DEM的高程差直方图呈现沿零值对称的正态分布,高程差均值仅为-1.56 m,标准差为12.16 m。这

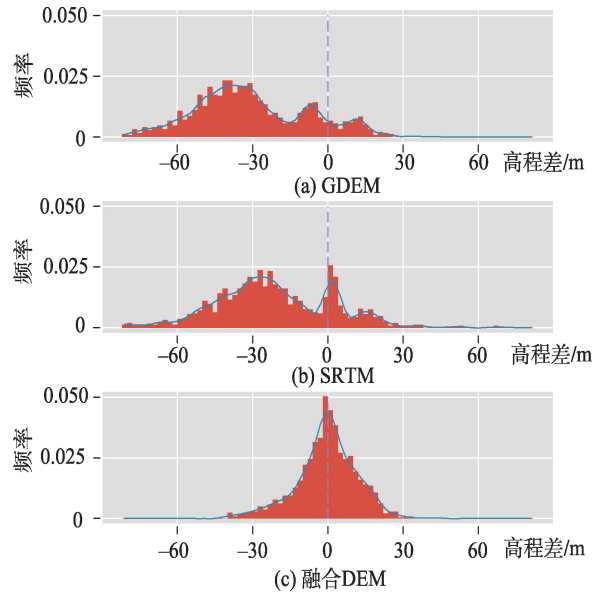


图8 DEM高程差直方图

Fig. 8 Histogram of the differences between DEM and referenced samples

说明本文提出的DEM融合方法,有效地剔除了地貌特征对DEM的影响。

将样本点按其实测高程值降序排列并依次编号,依次绘制出样本点在GDEM、SRTM和融合DEM上的高程折线图(图9)。从图9可看出,SRTM与GDEM高程值整体上低于实测高程值,随着地表高程的增加,SRTM与GDEM的高程误差逐渐增大,二者在低海拔地区的高程精度均优于高海拔地区。相比而言,融合DEM高程值紧紧围绕着参考高程值小幅度地上下波动,其精度明显优于融合前的GDEM与SRTM。

将1:5万地形图数字化的等高线作为实际地形的等高线,并提取融合前后DEM的等高线,选取局部地区进行放大,以更好地显示对比效果。由图10可以看出,配准后的GDEM和SRTM在山峰山脊等处所测高程偏低,在山谷地区所测高程偏高,这说明两种DEM数据的精度受到了地貌特征的影响,而融合后DEM的高程在山峰山脊等处得到了升高,在山谷地区得到了降低,融合DEM与地形图等高线之间的差距大幅减小,表明地貌特征对DEM高程造成的误差得到了相应的改正。此外,融合DEM相当于1:25万地形数据、其等高线较为平滑,用于验证的1:5万地形图等高线细节更为明显,但是二者趋势基本一致,后者的波动变化总是围绕着前者,说明融合后DEM的高程精度是可靠的。

对GDEM、SRTM和融合后的DEM提取坡度并进行重分类,以高程样本点为参照,分别计算不

同坡度区间中GDEM、SRTM和融合DEM的高程均方根误差,结果如图11所示^[29]。从图11可看出,在各坡度区间中都是GDEM精度最差,融合DEM精度最优,SRTM居中。3种DEM的RMSE值均随着坡度的增大而增大,整体上与坡度呈正相关。融合DEM的RMSE值在各坡度区间均低于GDEM和SRTM,且增加趋势较为平稳,说明坡度对DEM高程精度的影响在融合后得到了降低。

不同坡向范围下的GDEM、SRTM、融合DEM与高程样本点之间的RMSE值如图12所示。在北坡、东北坡、东坡、东南坡和南坡,GDEM高程精度明显低于SRTM;在西南坡、西坡和西北坡,GDEM与SRTM高程精度相近,GDEM略优于SRTM;在8个不同坡向下,融合后的DEM高程精度得到了显著提高,其中北坡、西北坡、西坡和西南坡,融合后DEM较融合前精度提升最为明显。GDEM和SRTM的RMSE取值波动较大,范围约为24~40 m,融合后的DEM精度受坡向影响较小,RMSE取值在各方向表现稳定,约在10~16 m范围内变化。

5 结论

ASTER GDEM与SRTM在不同地区受地形、地貌以及植被的影响,DEM在水平和高程两方面都存在着程度不一的误差。本文采用线状地貌特征(河流线对)替代传统的同名点(河流交叉点)进行地理配准,消除了个别粗差点的影响,大幅度地

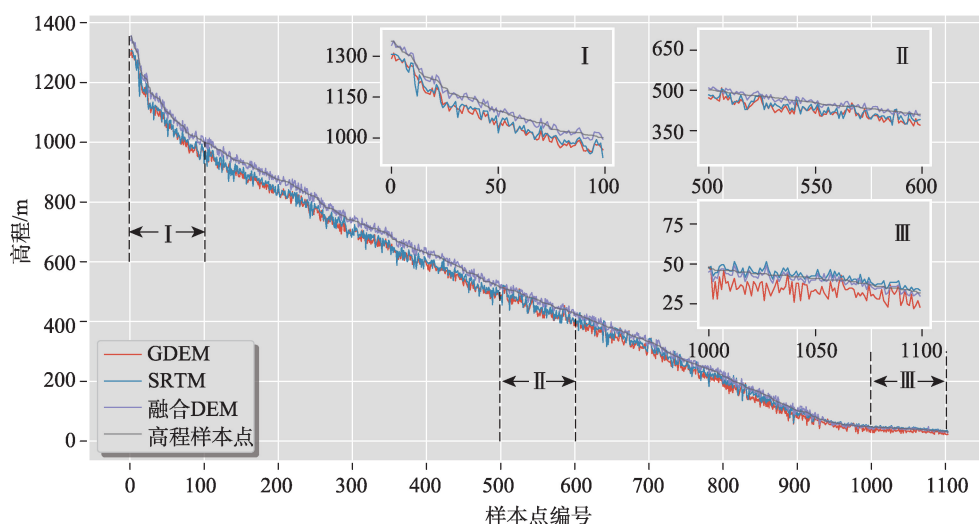


图9 样本点的高程序列图

Fig. 9 Sequence of elevation of samples by descending order

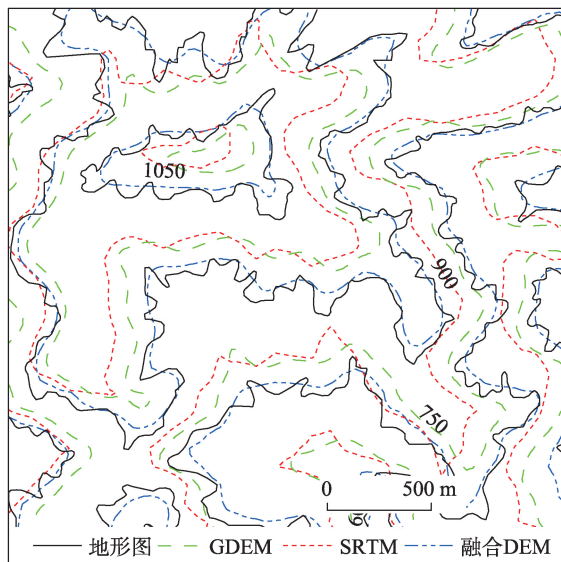


图10 融合前后的DEM等高线套和效果图(局部)

Fig. 10 The contours of DEM before and after fusion in local area

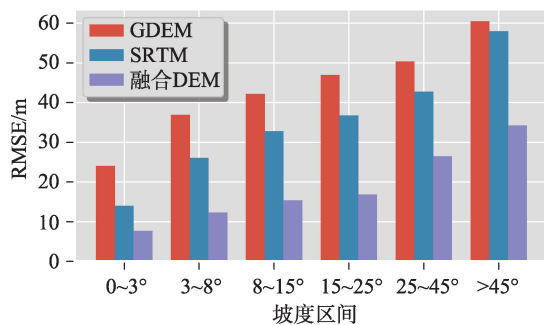


图11 不同坡度区间中各DEM的RMSE

Fig. 11 The RMSE of DEMs in different slope zones

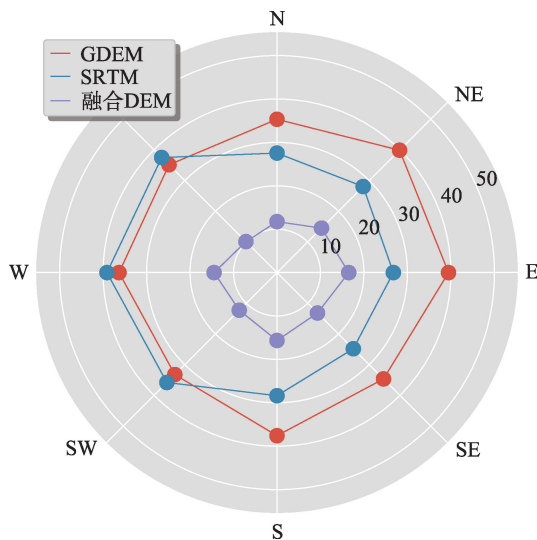


图12 不同坡向下各DEM的RMSE

Fig. 12 The RMSE of DEMs in different aspects

提高了DEM地理配准精度;更重要的是,基于地貌单元的高程融合方法不但剔除了不同地貌类型对高程的影响,而且提出适合地貌过渡区的高程融合优化算法,实现了融合后的高程在不同地貌单元之间的平滑过渡。同1:5万地形图样本数据比较,结果表明在研究区内,GDEM向北偏移1 m,SRTM向西偏移30 m并向北偏移90 m。地理配准后的DEM融合结果,其高程差整体上呈正态分布,消除了地貌单元之间的差异,整体精度相对于GDEM和SRTM分别提高63.95%、57.45%。

GDEM与SRTM数据质量不但受地貌因素影响,还受地表植被、地形(坡度、坡向)的影响。此外,GDEM与SRTM数据分别采用立体像对和InSAR方法获取,数据获取方法、处理过程、遥感设备特性等因素会对DEM数据精度产生重要影响^[30],如遥感平台飞行方向、传感器成像角度与山脉走向之间的角度是否会造成2种DEM产生高程差异。这些因素对DEM质量和DEM数据融合的影响还有待深入研究。

参考文献(References):

- [1] 张朝忙,刘庆生,刘高焕,等. SRTM 3与ASTER GDEM数据处理及应用进展[J].地理与地理信息科学,2012,28(5): 29-34. [Zhang C M, Liu Q S, Liu G H, et al. Data processing and application progress of SRTM 3 and ASTER GDEM[J]. Geography and Geo-information Science, 2012, 28(5):29-34.]
- [2] Zandbergen P. Applications of shuttle radar topography mission elevation data[J]. Geography Compass, 2008,2 (5):1404-1431.
- [3] Varga M, Bašić T. Accuracy validation and comparison of global digital elevation models over Croatia[J]. International Journal of Remote Sensing, 2015,36(1):170-189.
- [4] Zhao S M, Cheng W M, Zhou C H, 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.
- [5] 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. [Hu J P, Guan X R, Liu X J. Spatial distribution of SRTM DEM and ASTER GDEM error in China[J]. Geography and Geo-information Science, 2017,33(4):28-33.]
- [6] 武文娇,章诗芳,赵尚民,等. 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. [Wu W J, Zhang S F, Zhao S M, et al. Analysis and comparison of SRTM1 DEM and ASTER GDEM V2 data[J]. Journal of Geo-information Science,

- 2017,19(8):1108-1115.]
- [7] 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. [Guo X Y, Zhang H Y, Zhang Z X, 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.]
- [8] 赵国松,杜耘,凌峰,等. ASTER GDEM与SRTM3高程差异影响因素分析[J]. 测绘科学,2012,37(4):167-170. [Zhao G S, DU Y, Ling F, et al. Analysis of influencing factors on height differences between ASTER GDEM and SRTM3[J]. Science of Surveying & Mapping, 2012, 37(4):167-170.]
- [9] Luana S, Hou X, Wang Y. Assessing the accuracy of SRTM DEM and ASTER GDEM datasets for the coastal zone of Shandong province, eastern China[J]. Polish Maritime Research, 2015,22(s1):15-20.
- [10] 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.
- [11] 詹蕾,汤国安,杨昕. SRTM DEM高程精度评价——以陕西省为例[J]. 地理与地理信息科学,2010,26(1):34-36. [Zhan L, Tang G A, Yang X. Evaluation of SRTM DEMs' elevation accuracy: A case study in Shaanxi province[J]. Geography and Geo-information Science, 2010,26(1):34-36.]
- [12] 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. [Nan X, Li A N, Bian J H. Comparison of the accuracy between SRTM and ASTER GDEM over typical mountain area: a case study in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Geo-information Science, 2015,17(1):91-98.]
- [13] Hu Z, Peng J, Hou Y, et al. Evaluation of recently released open global digital elevation models of Hubei, China[J]. Remote Sensing, 2017,9(3):262.
- [14] Mukherjee S, Joshi P K, Mukherjee S, et al. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM)[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013,21:205-217.
- [15] Buffington K J, Dugger B D, Thorne K M, et al. Statistical correction of lidar-derived digital elevation models with multispectral airborne imagery in tidal marshes[J]. Remote Sensing of Environment, 2016,186:616-625.
- [16] 谢翠贞. 基于SRTM3 DEM与ASTER GDEM的DEM融合方法研究[D]. 南昌:东华理工大学,2015. [Xie C Z. A study of DEM fusion method based on SRTM3 DEM and ASTER GDEM[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2015.]
- [17] Tran T A, Raghavan V, Masumoto S, et al. A geomorphology-based approach for digital elevation model fusion - case study in Danang city, Vietnam[J]. Earth Surface Dynamics, 2014,2(1):403-417.
- [18] Papasaika H, Kokiopoulou E, Baltasvias E, et al. Fusion of digital elevation models using sparse representations [C]. ISPRS Conference on Photogrammetric Image Analysis. Springer-Verlag, 2011:171-184.
- [19] 陈传法,郑作亚,岳天祥. 基于快速傅里叶变换的ASTER与SRTM有效融合研究[J]. 国土资源遥感,2010,22(4):19-22. [Chen C F, Zheng Z Y, Yue T X. Efficient fusion of ASTER and SRTM based on fast fourier transform[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2010,22(4):19-22.]
- [20] Lalonde T, Shortridge A, Messina J. The influence of land cover on Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) elevations in low-relief areas[J]. Transactions in GIS, 2010, 14(4):461-479.
- [21] Dewitt J D, Warner T A, Conley J F. Comparison of DEMs derived from USGS DLG, SRTM, a statewide photogrammetry program, ASTER GDEM and LiDAR: Implications for change detection[J]. Giscience and Remote Sensing, 2015,52(2):179-197.
- [22] Bonnet M P, Timouk F, Molina J, et al. Accuracy assessment of SRTM v4 and ASTER GDEM v2 over the Altiplano watershed using ICESat/GLAS data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2015,36(2):465-488.
- [23] Hirt C, Filmer M S, Featherstone W E. 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.
- [24] Karkee M, Steward B L, Aziz S A. Improving quality of public domain digital elevation models through data fusion[J]. Biosystems Engineering, 2008,101(3):293-305.
- [25] Dong Y, Chang H C, Chen W, et al. Accuracy assessment of GDEM, SRTM, and DLR-SRTM in Northeastern China[J]. Geocarto International, 2015,30(7):1-14.
- [26] 张凤莲. 多元线性回归中多重共线性问题的解决办法探讨[D]. 广州:华南理工大学,2010. [Zhang F L. The discussion on solutions of multicollinearity in multilinear regression models[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.]
- [27] 覃文忠. 地理加权回归基本理论与应用研究[D]. 上海:同济大学,2007. [Qin W Z. The basic theoretics and application research on geographically weighted regression [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.]
- [28] Qin C Z, Zhu A X, Qiu W L, et al. Mapping soil organic matter in small low-relief catchments using fuzzy slope position information[J]. Geoderma, 2012,171-172(2):64-74.
- [29] 朱梅,李发源. 坡度分级对地面坡谱的影响研究[J]. 测绘科学,2009,34(6):165-167. [Zhu M, Li F Y. Influence of slope classification on slope spectrum[J]. Science of Surveying and Mapping, 2009,34(6):165-167.]
- [30] 张泉. 中国地区SRTM数据高程误差的分布特征[D]. 西安:西北大学,2015. [Zhang Q. Distribution of SRTM error across China[D]. Xi'an: Northwest University, 2015.]