

引用格式: 秦臣臣, 陈传法, 杨娜, 等. 基于ICESat/GLAS的山东省SRTM与ASTER GDEM高程精度评价与修正[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 351-360. [Qin C C, Chen C F, Yang N, et al. Elevation accuracy evaluation and correction of SRTM and ASTER GDEM in Shandong province based on ICESat/GLAS[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(3): 351-360.] DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190411

基于ICESat/GLAS的山东省SRTM与ASTER GDEM高程精度评价与修正

秦臣臣¹, 陈传法^{1*}, 杨娜², 高原¹, 王梦樱¹

1. 山东科技大学测绘科学与工程学院, 青岛 266590; 2. 济南市勘察测绘研究院, 济南 250101

Elevation Accuracy Evaluation and Correction of SRTM and ASTER GDEM in Shandong Province based on ICESat/GLAS

QIN Chenchen¹, CHEN Chuanfa^{1*}, YANG Na², GAO Yuan¹, WANG Mengying¹

1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Jinan Geotechnical Investigation and Surveying Institute, Ji'nan 250101, China

Abstract: Shuttle Radar Topography Mission(SRTM) and Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) GDEM have a high spatial resolution and wide spatial coverage, which play an important role in many Earth researches. However, their error distributions are heterogeneous on different terrain types. In order to assess the elevation accuracy of the two DEMs, data from Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) carried on the Ice, Cloud, and land Elevation Satellite (ICESat) are often used as the checkpoints due to their high accuracy. Taking Shandong Province as the research area, the accuracy of SRTM and ASTER GDEM are first evaluated by ICESat/GLAS in the years of 2003-2010 in this paper. Results indicate that the root mean squared errors (RMSEs) of SRTM and ASTER are 5.57 m and 7.20 m, respectively, which are much lower than the nominated accuracy. We further analyzed the effect of terrain slope and landscape type on the accuracy of SRTM and ASTER GDEM. Specifically, the study area was first divided into different sub-regions according to slope ranges ($0\sim 5^\circ$, $5\sim 10^\circ$, $10\sim 15^\circ$, $15\sim 20^\circ$, $20\sim 25^\circ$, $30\sim 35^\circ$, $35\sim 40^\circ$, $40\sim 45^\circ$) and landscape types (farmland, shrub, forest, grassland, wetlands, water body), respectively. Then, the RMSE of each sub-region was computed and analyzed. We found that with the increasing of terrain slope, the accuracy of the two DEMs decreases, and under different land cover types, they also have different accuracy. More specifically, the two DEMs have a higher accuracy on farmland and shrub; while have a lower accuracy on forest and wet lands. To improve the accuracy of SRTM and ASTER, their error surfaces were first produced by interpolating the elevation differences between the DEM and randomly selected ICESat/GLAS data with the proportion of 90%. The interpolation methods include Inverse Distance Weight (IDW), Ordinary Kriging (OK), terrain-to-grid

收稿日期: 2019-07-30; 修回日期: 2019-12-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41804001, 41371367); 山东省自然科学基金项目(ZR2019MD007, ZR2019BD006); 山东省高等学校青创科技支持计划(2019KJH007)。 [**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41804001, 41371367; Shandong Provincial Natural Science Foundation, China, No.ZR2019MD007, ZR2019BD006); A Project of Shandong Province Higher Educational Youth Innovation Science and Technology Program, No.2019KJH007.]

作者简介: 秦臣臣(1993—), 男, 山东枣庄人, 硕士生, 研究方向为空间数据质量改善。E-mail: 1157860213@qq.com

*通讯作者: 陈传法(1982—), 男, 山东沂源人, 教授, 主要从事数字地形建模及空间数据质量改善等研究。

E-mail: chencf@lreis.ac.cn

method (T2G) and Natural Neighborhood (NN). Then, the interpolated error surfaces were added to the original DEMs. Accuracy assessment of the improved SRTM and ASTER using the remaining 10% ICESat/GLAS demonstrates that IDW with the RMSEs of 2.20 m and 5.31 m is more accurate than the other interpolation methods. IDW is closely followed by T2G and NN. It is surprised to see that OK produces the worst results. Hence, SRTM and ASTER GDEM are improved with the IDW-based error surfaces. The ICESat-2 satellite was launched on September 15, 2018. It can emit 10,000 laser pulses per second, monitoring the height of glaciers and land in unprecedented detail. ICESat-2 collects elevation data over all surfaces spanning the world's frozen regions, forests, lakes, urban areas, and more. Thus, further researches will focus on improving the accuracy of SRTM and ASTER with the ICESat2 data.

Key words: SRTM; ASTER GDEM; ICESat/GLAS; accuracy correction; interpolation; Shandong Province; error distribution; rectification method

***Corresponding author:** CHEN Chuanfa, E-mail:chenchf@lreis.ac.cn

摘要: SRTM3 和 ASTER GDEM V2 数据具有较高的空间分辨率和广泛的覆盖范围,对于地学研究具有重要意义;但在不同地形复杂度和地面覆盖物区域,两类数据的误差分布并不均匀。SRTM3 和 ASTER GDEM V2 数据自公布以来,其精度修正一直是研究热点。然而大范围区域精度验证缺乏有效手段,传统方法可靠性差且数据获取成本较高。自 ICESat-1 数据公开以来,它们已成为 SRTM3 和 ASTER GDEM V2 精度评定的主要检核点。为此,本文以山东省为研究区域,借助 ICESat-1 评估了 SRTM3 和 ASTER GDEM V2 的高程精度,并根据插值误差曲面对两种 DEM 进行了修正。分析表明,原始 SRTM 和 ASTER 高程中误差分别为 5.57 m 和 7.20 m,均高于标称精度;随着坡度的增大,高程精度呈降低的趋势。通过分析土地覆盖类型与误差分布关系表明:农田、灌丛土地类型精度较高;森林、湿地精度较低。分别采用反距离加权、普通克里金、地形转栅格和自然邻域插值方法构建误差曲面。结果表明:不同的插值方法构建的误差曲面的特征和精度也不同。其中,反距离加权修正的效果最佳,其次是地形转栅格和自然邻域,而普通克里金修正的效果最差。

关键词: SRTM; ASTER; ICESat/GLAS; 高程精度评价; 插值; 山东省; 误差分布; 修正方法

1 引言

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是数字地形分析的基础数据,已广泛应用于全球变化、数字地球、自然灾害等领域^[1]。目前,全球尺度公开的 DEM 数据包括 SRTM 和 ASTER GDEM 等。其中,SRTM 由合成孔径雷达干涉测量技术获取,可用的数据分辨率分别为 30 m (SRTM1) 和 90 m (SRTM3)^[2]; ASTER GDEM 由光学立体相对获得,空间分辨率为 30 m。全球 DEM 数据的精度评价至关重要,它们是各种模型的重要参数,其精度决定了研究结果的精度。

自 SRTM 和 ASTER GDEM 数据发布以来,对它们的精度评定一直是研究热点。基于 GPS 野外测量数据是检验 DEM 高程精度最常用的方法。例如:Chaieb 等^[3]在研究区域布设 GPS 控制点,并结合统计分析方法对 ASTER GDEM 和 SRTM 高程精度进行评定;郭笑怡等^[4]以野外实测 GPS 点高程作为真值,从高程精度、位置精度和坡度因子 3 方面对比分析了 ASTER GDEM 和 SRTM3 数据精度;袁乐先

等^[5]为了分析所建 DEM 可靠性,利用中国南极内陆冰盖考察所采集的 GPS 实测数据,对所建立的 DEM 精度进行了验证分析。然而,野外测量工作量大,难以采集大量的控制点,不适合大面积区域 DEM 精度验证。为此,部分学者采用高精度 DEM 作为参考。如张朝忙等^[6]以 1:50 000 DEM 分析了 SRTM 高程精度;卢丽君等^[7]为满足复杂地形地区高精度 DEM 制图需要,引入外部 DEM 估计高程的误差范围;云焯等^[8]在 InSAR 定标中用已知高程精度 DEM 与待定标的 InSAR 系统生成的 DEM 进行比较,利用参考 DEM 模拟 SAR 图像,获得大量定标所需的控制点坐标。自 2003 年星载激光雷达数据 ICESat/GLAS 发布以来,它们为评估大面积区域 DEM 精度提供了可能。如杜小平等^[9]以 ICESat 高程数据为参考,综合利用空间分析、三维可视化与统计分析方法,对中国典型低海拔沿海平原和高海拔山地的 SRTM 和 ASTER GDEM 数据高程精度进行了对比分析;吴宇鑫等^[10]利用 ICESat 数据作为高程控制点数据,对 SRTM1 和 SRTM V4 进行了评价分析;万杰等^[11]以 ICESat/GLAS 激光高度计

数据为参照数据,分析了SRTM在中国青藏高原地区的高程精度,以及SRTM高程数据与地形因子间的关系。为此,本文以ICESat/GLAS为参考数据,利用统计分析方法,结合坡度数据和土地覆盖数据,对山东省区域SRTM和ASTER GDEM数据进行精度评定。

随着DEM的广泛使用,有关DEM精度修正一直是研究热点。如沈焕锋等^[12]以ICESat为控制点,利用神经网络模型对SRTM1数据空洞填充,融合生成空间无缝DEM;Yue等^[13]融合SRTM1、ASTER GDEM V2和ICESat测高数据,采用曲面填充方式提升了SRTM1垂直精度;田明璐等^[14]利用处理后的ASTER数据对SRTM进行融合,从而实现了SRTM数据空值填补;孙亮等^[15]提出基于小波分析的多源DEM数据融合方法,经过重采样、数据配准等步骤生成融合数据源。但由于不同DEM产品之间存在差异,噪声和数据空洞问题比较严重,且高分辨率DEM数量有限,制约了该方法的大面积推广。另外,基于线性回归模型的方法也常用于DEM精度修正。如Zhao等^[16]以土地覆盖、冠层高度数据为影响因子对SRTM修正;Su等^[17]利用冠层高度、叶面积指数和坡度等数据以修正SRTM。然而,这类方法存在工作量大、数据难以获取等问题。针对上述问题,本文以山东省为研究区域,借助ICESat分析SRTM和ASTER高程精度,并采用插值误差曲面对它们修正以提高其精度。

2 研究区概况与数据源

2.1 研究区概况

山东省位于中国东部沿海,黄河下游,34°22.9'N—38°24.01'N,114°47.5'E—122°42.3'E。山东省东西长721.03 km,南北长437.28 km,全省陆域面积达 $1.558 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

山东省地形复杂,山地丘陵为主,中部地势突起,为鲁中南山地丘陵区,西部、北部是黄河冲积而成的鲁西北平原区,是华北大平原的一部分。境内平原占陆地总面积55%,丘陵占13.2%,湖泊占4.4%,洼地占4.1%,其它占7.8%。

2.2 数据来源

SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)由美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量,是由美国“奋进”号航天飞机搭载SRTM系统,

于2000年2月11日至2000年2月22日完成的测量任务。此数据产品2003年开始公开发布,经历多次修订,目前的数据修订版本为V4.1。SRTM3是应用最广泛的数据,分辨率为90 m,其高程标称为 $\pm 16 \text{ m}$ 。SRTM数据覆盖范围为60°N—56°S之间,覆盖地球80%陆地。文中SRTM数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。SRTM数据以WGS84为参考椭球体,以EGM96模型为水准面^[18-23]。

ASTER GDEM数据由日本MET和美国NASA联合研制并免费向公众分发。产品数据基于“先进星载热发射和反辐射计(ASTER)”数据计算而成,是目前唯一覆盖全球陆地表面的高分辨率影像数据。自2009年6月29日V1版本数据发布以来,在全球对地观测研究中取得了广泛的应用;ASTER GDEM V2版则采用了一种先进的算法对V1版GDEM影像进行改进,提高了数据的高程精度和空间分辨率精度。ASTER GDEM垂直标称精度 $\pm 20 \text{ m}$,采用立体相对处理等步骤完成。ASTER数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),文中采用的数据版本为V2。ASTER数据以WGS84为参考椭球体,以EGM96模型为水准面。

ICESat/GLAS数据来源于美国国家冰雪数据中心(<http://nsidc.org/data/ICE-Sat/>),为GLAH14陆地测高数据产品。ICESat(Ice, Cloud and Land Elevation Satellite)由NASA发射,该卫星上的GLAS(地学激光测高系统)用来测量冰盖高及其随时间的变化、云层和气溶胶的外形、陆地高和植被的厚度以及海冰的厚度等。ICESat的目标任务包括精确测量地形和植被冠层高度的要素,表面高程测量精度达到 $\pm 13.8 \text{ cm}$,精度远高于SRTM和ASTER标称精度。数据采集时间集中在植被干扰较少的秋冬季节,保证了数据的可靠性^[24]。搭载的地球科学激光测高仪系统具有1064 nm的激光通道,可以轻易穿过云层和植被,稳定性较强。本文下载了研究区域所有的观测数据,包含14个周期,432个条带数据。ICESat/GLAS数据的参考椭球为Topex/Poseidon椭球体,高程为大地高。

全球30 m土地覆盖数据由国家综合地球观测数据共享平台(<http://www.chinageoss.org/geoarc/2018/B/sjxz.html>)提供。全球土地覆盖图以30 m分辨率的多光谱数据为主要数据集,结合部分高分辨率数据、高程数据和灯光数据等,以监督分类方法生成。文中采用数据为2017年Landsat8卫星获取的全球土地覆盖数据。主要是利用不同类型地物

在太阳光谱范围的不同光谱反射率特性进行分类、制图。Landsat 系列数据具有全球覆盖、波谱范围宽、空间分辨率较高、数据质量高、重放周期较短等优点,被大量利用于地表覆盖制图、变化监测、生态多样性评估等领域。相比于 Landsat5 和 7,在可见短波红外波段,Landsat8 新增了一个深蓝波段,因此总共具有 7 个波段,空间分辨率是 30 m,覆盖了全球除南北极外大部分大陆地区。该数据 10 个一级分类为:农田、森林、草地、灌丛、湿地、水体、苔原、不透水层、裸地、冰雪。

3 研究方法

3.1 坐标转换

从美国国家冰雪数据中心下载了山东省区域共计 845 074 个 ICESat/GLAS 点数据。提取 4 种所需参数: d_lat 、 d_lon 、 d_elev 和 d_gdHt ,分别表示测点纬度、经度、相对于参考椭球体的高度和大地水准面与参考椭球面的差距。为了将 ICESat/GLAS 数据与 DEM 数据进行比较,需将 ICESat/GLAS 与 SRTM 和 ASTER GDEM 转换为同一平面和高程基准。WGS84 椭球和 Topex/Poseidon 椭球高程差异约在 70~72 cm 之间。ICESat/GLAS 数据转换为以 WGS84 椭球为参考椭球的高程基准:

$$H_{WGS84} = h - N - 0.7 \quad (1)$$

式中: h 值是地面点相对于参考椭球体 (Topex/Poseidon) 的高度; N 值为大地水准面差距,是大地水准面和参考椭球面的距离,根据海平面的起伏,该值有正有负。将 ICESat 数据与 SRTM 和 ASTER GDEM 进行叠加,如图 1 所示。

3.2 插值方法及修正流程

地形转栅格专门用于创建符合真实地表的 DEM。在施加约束的同时,地形转栅格会为栅格内插高程值,从而确保地形结构连续,准确呈现输入等值线数据中的山脊和河流。自然邻域法是使用附近点的值和距离预估每个像元的表面值,该插值使用多边形进行空间划分,每个插值点的计算来自于和其邻接的相邻多边形的点及由插值点形成的新的多边形与原始多边形的重叠区域所占比重称为插值权重。反距离加权是一种常用且简便的空间插值方法,它以插值点与样本点的距离为权重进行加权平均,离插值点越近的样本点赋予的权重越大。反距离加权通过对邻近区域的每个采样点值平均运算获得内插单元值。克里金插值是一种基于统计学的插值方法,普通克里金方法是最普遍和应用最广的克里金插值方法,它假设采样点值不存在潜在的全局趋势,只用局部的因素就可以很好地估测未知值。反距离加权和普通克里金通用公式如下:

$$z(x_0) = \sum_{i=1}^N w_i z(x_i) \quad (2)$$

式中: $z(x_i)$ 和 w_i 分别代表采样点的值和权重; x_0 代表待求点; N 代表着用来参与计算采样点的数量。

为了检验各种插值方法的计算精度,首先将所有 ICESat/GLAS 数据随机分为 90% 训练点和 10% 检核点,然后将训练数据分别与 2 种 DEM 相减得到误差值,并采用参数优化后的反距离加权、普通克里金、地形转栅格和自然邻域 4 种插值方法构建误差曲面,进而利用栅格计算工具将误差曲面叠加到原始 DEM。最后利用检核数据对修正后的 SRTM

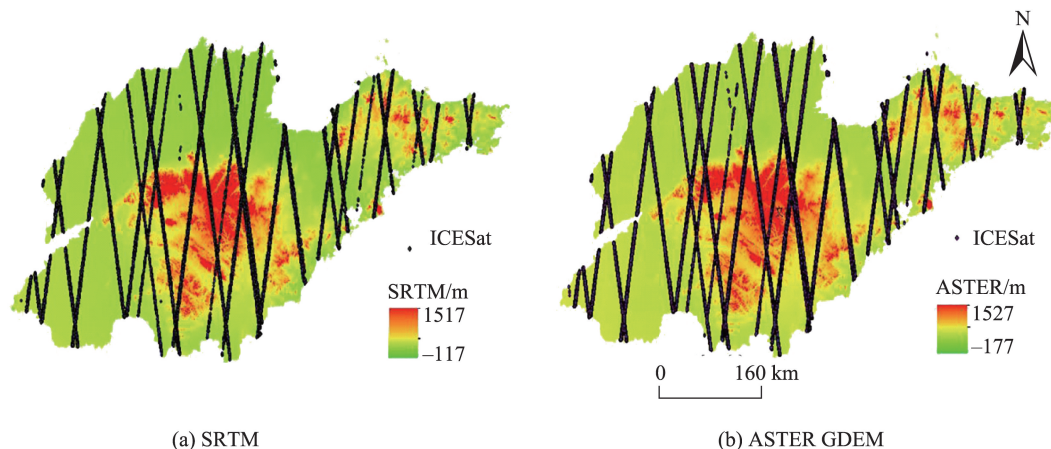


图1 山东省 ICESat/GLAS 分布

Fig. 1 Distribution of ICESat/GLAS in Shandong Province

和ASTER进行精度检核。精度评定和插值改正流程图如图2所示。

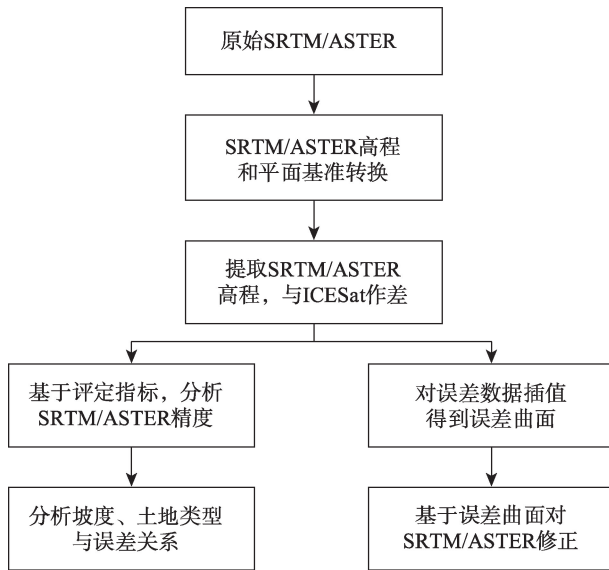


图2 精度评定和插值改正流程

Fig. 2 Flow chart of accuracy assessment and correction of SRTM and ASTER

4 结果及分析

4.1 DEM精度分析

本文将ICESat/GLAS与SRTM和ASTER GDEM高程值作差,对二者高差进行分析。由于ICESat/GLAS数据采集方式受到气溶胶和云层的影响,一部分数据采集的是云层的高程数据,因此选择3倍标称精度(± 48 m)作为阈值进行粗差剔除,并对差值的点数目、最大值、最小值、平均误差、标准差和均方差进行统计。平均误差(M)、标准差(SD)和均

方差(RMSE)的公式如下:

$$M = \frac{\sum d_i}{n} \quad (3)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (d_i - M)^2}{n}} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}} \quad (5)$$

式中: d_i 为ICESat/GLAS与SRTM和ASTER GDEM的高程差; n 为ICESat/GLAS点的数量; M 为平均误差。

ICESat/GLAS与SRTM和ASTER GDEM高差统计分析,如表1所示。

表1 ICESat/GLAS与误差统计

Tab. 1 Statistics of ICESat/GLAS and elevation errors

DEM	点数/个	最大值/ m	最小值/ m	平均值/ m	标准差/ m	均方差/ m
SRTM	335 716	47.92	-47.83	-0.25	5.57	5.57
ASTER	328 366	47.94	-47.65	0.08	7.20	7.20

4.2 SRTM和ASTER GDEM误差特征

粗差剔除后,SRTM和ASTER GDEM误差分布直方图如图3所示。SRTM剩余高程点数为335 716个,整体呈正态分布,标准差为5.57 m,远优于标称精度^[25]。误差分布密集性很高,90.2%的高程点差值分布在-8~8 m之间,均值为-0.25 m。

对应的ASTER GDEM高程数据剩余328 366个,标准差为7.20 m,优于标称精度。ASTER GDEM和ICESat/GLAS高程差值分布相比SRTM更分散一些,76.3%的高程差值集中在-8~8 m之间,整体呈正态分布,均值为0.08 m。标准差和均方差均高于SRTM。

土地覆盖数据与误差关系表明(表2):2种

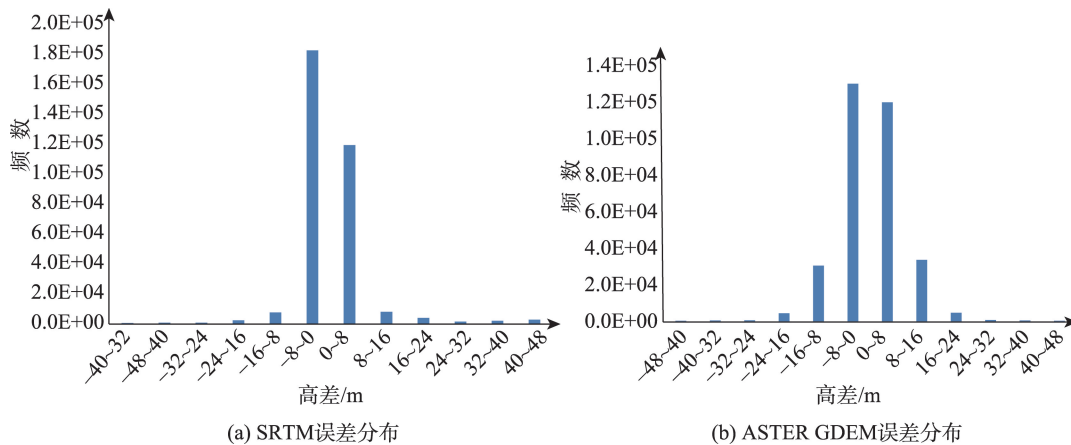


图3 SRTM和ASTER GDEM误差分布统计

Fig. 3 Error distributions of SRTM and ASTER GDEM

表2 山东省不同土地类型数据精度统计
Tab. 2 Accuracy statistics under different land types in Shandong Province (m)

土地覆盖类型	SRTM 均方差	ASTER GDEM 均方差
农田	4.13	5.15
灌丛	5.02	6.32
森林	8.52	11.35
草地	5.72	6.87
湿地	7.21	9.54
水体	7.05	9.07

DEM中,农田误差较小,其次为灌丛,而森林误差最大,其次为湿地。

4.3 高程精度和坡度之间的关系

对原始DEM数据进行坐标系转换,利用坡度分析工具对DEM进行坡度提取。提取SRTM坡度之后,对坡度以5°为间隔进行分带统计,统计结果如表3所示。结果显示:坡度10°以内的平坦地形SRTM的精度优于标称精度,误差随着坡度的增加而呈增大趋势,说明地形起伏与DEM精度有很强的关联性。

提取ASTER GDEM坡度之后,对坡度分带进行统计,统计结果如表4所示。ASTER GDEM坡度

分布显示:相比于SRTM误差随着坡度的变化,ASTER GDEM精度随坡度增加变化更大,坡度对ASTER GDEM精度影响更显著。

4.4 插值改正结果

基于反距离加权、普通克里金、地形转栅格和自然邻域4种插值方法生成SRTM误差曲面如图4所示。其中反距离加权生成误差曲面误差值跨度最大,尽可能地保存了原始插值点;地形转栅格生成的误差曲面高程跨度最小;克里金插值后的误差曲面相比其他3种插值方法高程最值点保留较少。

从插值曲面来看,反距离加权和普通克里金的插值曲面相似,表面呈条带状,且表面变化明显;反距离加权和普通克里金插值方式都是局部插值,因此,相较于其他插值方法,易受邻近点的影响。因此反距离加权和普通克里金出现明显的褶皱与样点条带分布有关。自然邻域和地形转栅格插值生成的误差曲面比较平滑,高程变化不明显。

基于4种插值方法生成的ASTER GDEM误差曲面如图5所示。反距离加权生成误差曲面高程跨度仍然最大,插值点保留完整;普通克里金生成误差曲面高程跨度最小。从误差曲面图来看,误

表3 SRTM坡度分带精度统计
Tab. 3 Accuracy statistics of SRTM under different slopes

坡度/°	点数/个	最大值/m	最小值/m	平均值/m	标准差/m	均方差/m
0~5	296 699	99.91	-95.60	0.32	4.40	4.40
5~10	18 631	99.44	-60.26	0.12	12.48	12.48
10~15	8 365	98.03	-91.48	0.60	19.00	19.01
15~20	3 752	99.74	-85.74	0.96	24.08	24.08
20~25	1 107	78.73	-79.00	1.21	29.16	29.17
25~30	193	97.94	-82.80	5.12	33.08	33.17
30~35	30	74.47	-72.86	-8.70	39.10	39.77

表4 ASTER GDEM坡度分带精度统计
Tab. 4 Accuracy statistics of ASTER GDEM under different slopes

坡度/°	点数/个	最大值/m	最小值/m	平均值/m	标准差/m	均方差/m
0~5	204 513	99.42	-86.30	-0.10	6.61	6.61
5~10	90 474	99.95	-97.83	0.37	8.40	8.40
10~15	21 270	98.96	-69.38	0.72	10.93	10.93
15~20	7 260	97.74	-91.60	0.54	12.83	12.83
20~25	3 222	99.56	-81.74	-0.47	13.85	13.85
25~30	1 362	78.97	-86.13	-1.45	15.93	15.94
30~35	445	59.58	-56.38	-1.09	17.64	17.66
35~40	135	84.85	-59.74	-3.64	23.59	23.68
40~45	23	62.67	-55.10	-9.58	21.72	22.21

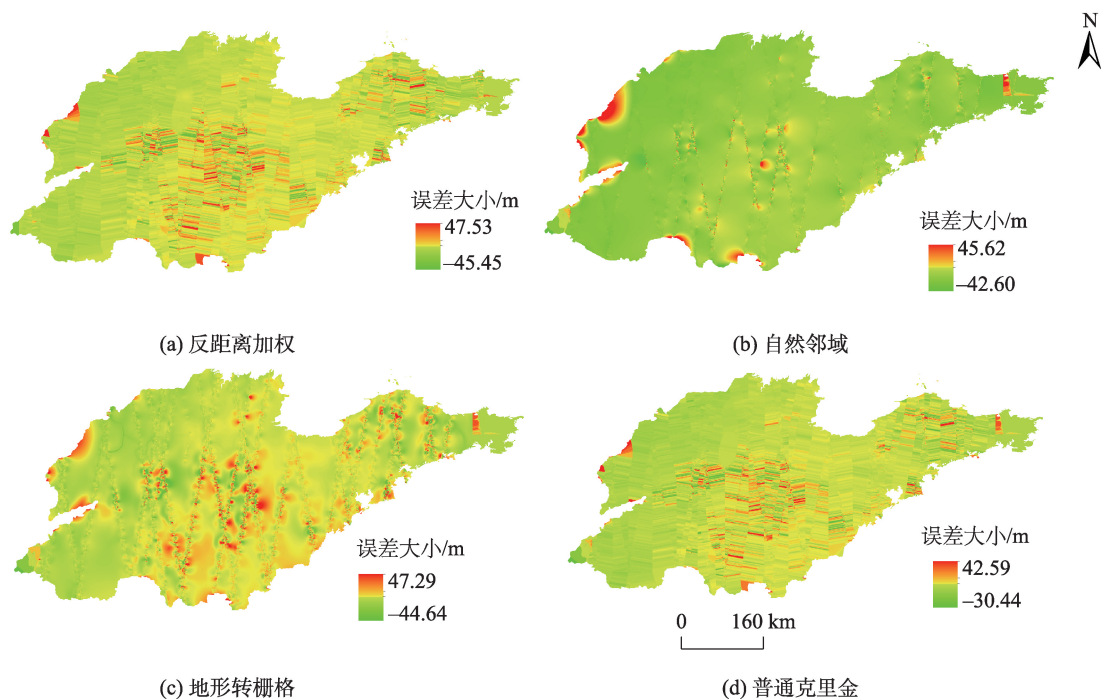


图4 基于4种插值方法生成的SRTM误差曲面对比
 Fig. 4 Comparison of SRTM error surfaces based on four interpolation methods

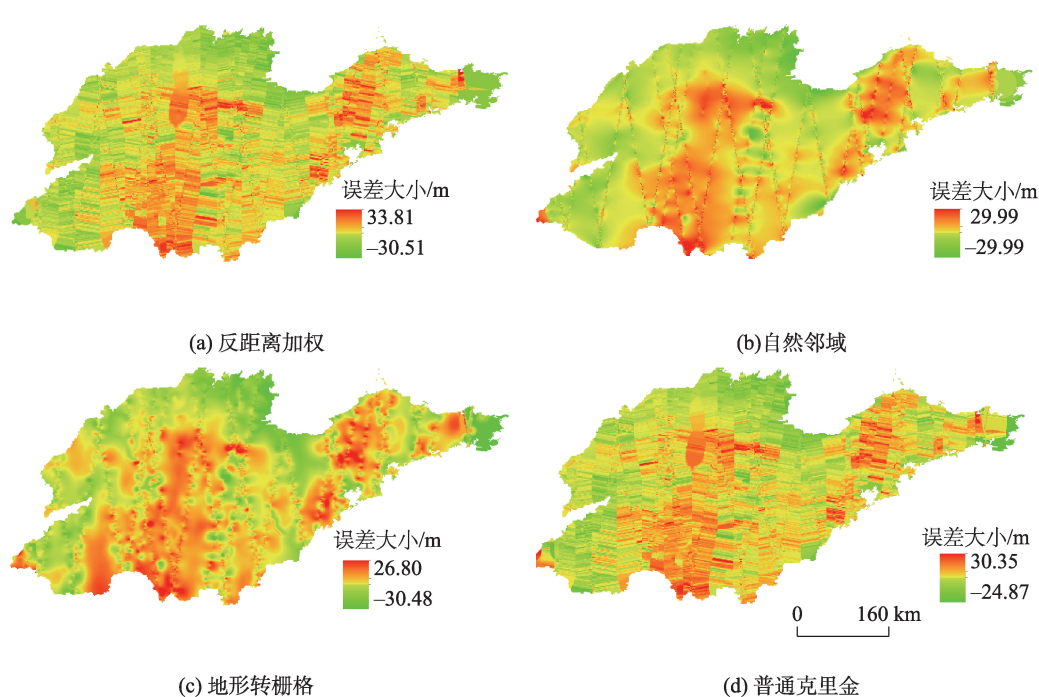


图5 基于4种插值方法生成的ASTER GDEM误差曲面对比
 Fig. 5 Comparison of ASTER GDEM error surfaces based on four interpolation methods

差分布都比较均匀。从误差曲面来看,反距离加权和普通克里金插值生成的误差曲面粗糙且变化明显,而自然邻域和地形转栅格插值生成一个平滑、渐变的表面^[26-30]。

修正后的2种DEM精度如表5所示。结果显示:SRTM高程精度提升显著,精度范围在2.0~4.74 m,其中反距离加权精度最优,达到2.20 m,地形转栅格和自然邻域精度稍差,普通克里金的效果最差。

表5 修正后的SRTM和ASTER GDEM精度分析

Tab. 5 Accuracy Analysis of SRTM and ASTER

GDEM using Interpolation Correction (m)		
插值方法	SRTM 均方差	ASTER GDEM 均方差
反距离加权	2.20	5.31
地形转栅格	2.57	5.47
自然邻域法	2.70	5.56
普通克里金	4.74	5.93

ASTER GDEM 修正后的精度范围在 5.31~5.93 m, 4种插值方法的效果差距不大。其中反距离加权表现最佳,精度达到 5.31 m,地形转栅格和自然邻域法次之,普通克里金的表现最差。出现上述结果的原因为:反距离权重插值以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,离插值点越近的样本点赋予的权重越大,且 ICESat 数据分布集中,因此反距离权重插值效果较好。自然邻域和地形转栅格插值方法以曲面光滑为基本假设,不适用于山东丘陵众多的地形。普通克里金插值方法假定待插值数据服从二阶平稳,故同样不适用于地形起伏较大的区域。需要注意的是,不同插值方法的插值精度受采样点密度、精度、分布以及地形复杂度影响,因此针对不同区域,各种插值方法的精度均有所不同。

利用反距离加权插值结果修正的 2 种 DEM 如图 6 所示。结果显示,2 种 DEM 最高值均有明显降低,其中,西南地区和北部地区变化明显,这主要是

因为修正后 DEM 去除了植被等非地面物影响。

5 结论与展望

本文基于 ICESat/GLAS 数据对 SRTM 和 ASTER GDEM 进行精度评估,并基于插值误差曲面对其进行了修正,得到以下结论:

(1) 山东省 SRTM 高程中误差为 5.57 m, ASTER GDEM 高程中误差为 7.20 m, SRTM 垂直精度高于 ASTER GDEM。通过 SRTM 和 ASTER GDEM 误差分布图可知,2 种 DEM 的误差整体呈正态分布。其中 SRTM 90.2% 的高程点差值分布在 -8~8 m 之间,均值为 -0.25 m; ASTER GDEM 76.3% 的高程点差值集中在 -8~8 m 之间,均值为 0.08 m。郭笑怡等^[4]选择吉林省蛟河市为实验区,得出 ASTER GDEM 和 SRTM 精度分别为 15.68 m 和 10.39 m;在实验区和山东省区域内均表明 SRTM 精度要高于 ASTER GDEM。通过对 SRTM 和 ASTER GDEM 坡度提取并统计可知:约 90% ICESat/GLAS 点分布在坡度 0~10° 内;2 种 DEM 误差均随坡度增加呈增大趋势,其中 SRTM 变化更显著。杜小平等^[9]对中国典型低海拔沿海平原地区和高海拔山地 SRTM、ASTER GDEM 数据高程精度进行了对比分析。结果表明,在低海拔地区,SRTM 高程精度达到 2.39 m, ASTER GDEM 精度达到 4.83 m;而在西南山地,这

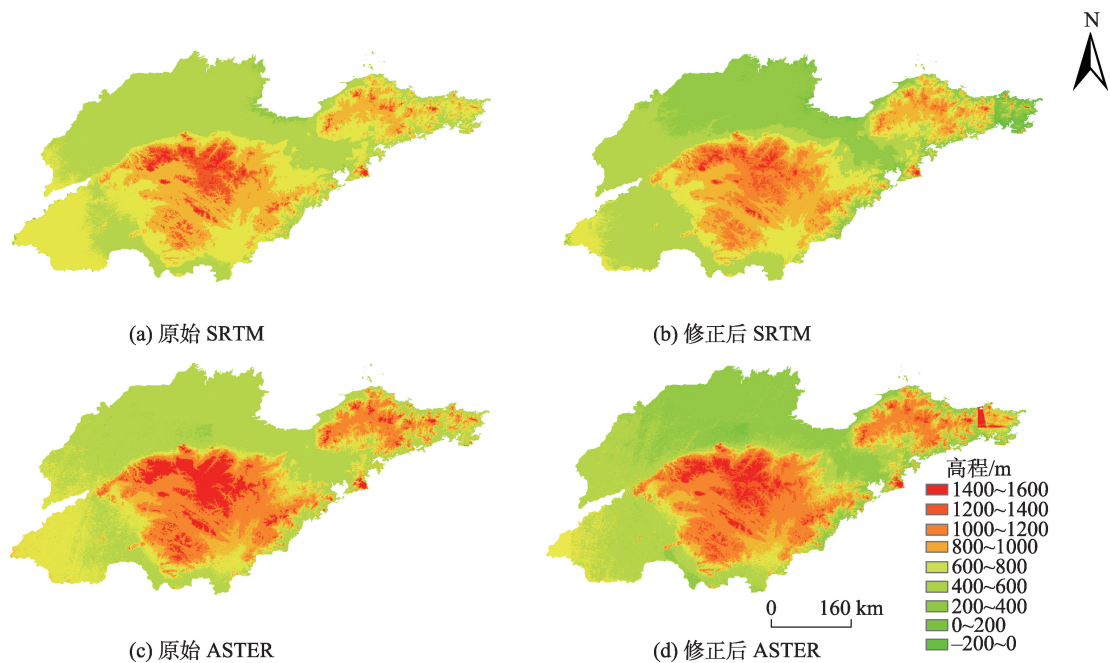


图6 山东省原始SRTM和ASTER与修正后对比

Fig. 6 Original SRTMs and ASTERs, and their improved versions

两种DEM精度大致相等。因此可知,地形起伏度对SRTM精度影响更显著,也验证了本文的结论。另外,本文结合土地覆盖数据对误差进行分类统计显示:农田、灌丛误差较小,优于整体精度;森林、湿地误差较大,远高于整体精度。本文反映了土地覆盖数据对DEM精度影响,为DEM误差修正提供了参考。

(2) 基于4种插值方法对SRTM和ASTER GDEM进行了修正。从修正效果来看,反距离加权效果最佳,SRTM精度由5.57 m提升至2.20 m,ASTER GDEM由7.20 m提升至5.31 m。地形转栅格和自然邻域法稍差,普通克里金效果最差。Zhao等^[4]以黄土高原为研究区域,基于线性回归模型使SRTM中误差减少了1 m。因此,插值曲面方法效果更显著。线性回归模型适用于植被覆盖度高、地形起伏度较大区域,在相对平坦地区效果不明显;插值曲面方法适用于大范围区域DEM精度修正。因此,文中提出的插值曲面方法适用性更强、效率更高,可广泛应用于各种地形区域DEM数据质量改善。

ICESat-2卫星于2018年9月15日发射,每秒可以发出10 000个激光脉冲,将以前所未有的细节来监测冰川、陆地的高度。美国宇航局(NASA)已宣布向公众提供ICESat-2全球数据,这将包含全球各地区陆地高度测量数据,以及南极洲周围海冰和格陵兰岛冰川的测量数据。为此,后续将借助ICESat-2数据对SRTM和ASTER进行修正,以进一步提高其高程精度。

参考文献 (References):

- [1] 唐川,齐信,丁军,等.汶川地震高烈度区暴雨滑坡活动的遥感动态分析[J].地球科学·中国地质大学学报,2010,35(2):317-323. [Tang C, Qi X, Ding J, et al. Dynamic analysis on rainfall-induced landslide activity in high seismic intensity areas of the Wenchuan earthquake using remote sensing image[J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2010,35(2):317-323.]
- [2] 陈俊勇.对SRTM3和GTOPO30地形数据质量的评估[J].武汉大学学报·信息科学版,2005,30(11):941-944. [Chen J Y. Quality evaluation of topographic data from SRTM3 and GTOPO30[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005,30(11): 941-944.]
- [3] Chaieb A, Rebaïr N, Bouazizb S. Vertical accuracy assessment of SRTM Ver 4.1 and ASTER GDEM Ver 2 using GPS measurements in central west of Tunisia[J]. Journal of Geographic Information System, 2016,8(1):57-64.
- [4] 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(3):75-80. [Guo X Y, Zhang H Y, Zhang Z X, et al. Comparative analysis of ASTER-GDEM and SRTM3 data quality accuracy [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011(3):75-80.]
- [5] 袁乐先,李斐,张胜凯,等.基于ICESat数据的南极冰盖DEM插值方法比较及精度分析[J].冰川冻土,2015,37(4):946-953. [Yuan L X, Li F, Zhang S K, et al. Comparing the interpolation algorithms and analyzing the accuracy of a digital elevation model of the Antarctic ice sheet based on ICESat data[J]. Journal of Glaciology, 2015,37(4):946-953.]
- [6] 张朝忙,刘庆生,刘高焕,等.太湖地区SRTMDEM高程精度质量评价[J].测绘科学,2013,39(3):139-142. [Zhang C M, Liu Q S, Liu G H, et al. Quality evaluation of elevation precision of SRTM DEM in Taihu lake area [J]. Science of Surveying and Mapping, 2013,39(3):139-142.]
- [7] 卢丽君,张继贤,王腾.一种基于高分辨率雷达影像以及外部DEM辅助的复杂地形制图方法[J].测绘学报,2011(4):61-65. [Lu L J, Zhang J X, Wang T. A DEM mapping method assisted by External DEM with high resolution InSAR data in complex terrain area[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011(4):61-65.]
- [8] 云焯,曾琪明,焦健,等.基于参考DEM的机载InSAR定标方法[J].测绘学报,2014,43(1):74-82. [Yun Y, Zeng Q M, Jiao J, et al. Calibration of Airborne Interferometric SAR data based on reference DEM[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014,43(1):74-82.]
- [9] 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(4):229-239. [Du X P, Guo H D, Fan X T, et al. Elevation accuracy evaluation of SRTM and ASTER GDEM in typical regions of China based on ICESat/GLAS data [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2013(4):229-239.]
- [10] 吴宇鑫,赵牡丹,高志远,等.中国3类典型区SRTMGL1和SRTMV4精度对比分析[J].水土保持研究,2019(4):36-42. [Wu Y X, Zhao M D, Gao Z Y, et al. Comparative analysis of the accuracy of SRTMGL1 and SRTM V4 in three typical regions of China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019(4):36-42.]
- [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. [Wan J, Liao J J, Xu T, et al. Accuracy evaluation of SRTM data based on ICESat/GLAS altimeter data: A case study in the Tibetan Plateau

- [J]. Remote Sensing for land and Resources, 2015,27(1): 100-105.]
- [12] 沈焕锋,刘露,岳林蔚,等.多源DEM融合的高差拟合神经网络方法[J].测绘学报,2018,47(6):854-863. [Shen H F, Liu L, Yue L W, et al. A multi-source DEM fusion method based on elevation difference fitting neural network[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018,47(6):854-863.]
- [13] Yue L, Shen H, Zhang L, et al. High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017,123:20-34.
- [14] 田明璐,常庆瑞,冯冰凇.利用ASTER数据融合的SRTM空值填补方法[J].测绘科学,2012(2):90-91,106. [Tian M L, Chang Q R, Feng B L. SRTM null value filling method using ASTER data fusion[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012(2):90-91,106.]
- [15] 孙亮,严薇,刘平芝,等.采用小波分析的SRTM DEM与ASTER DEM数据融合[J].测绘科学技术学报,2014(4): 388-392. [Sun L, Yan W, Liu P Z, et al. Data fusion of SRTM DEM and ASTER DEM based on wavelet analysis [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2014 (4):388-392.]
- [16] Zhao X, Su Y, Hu T, et al. A global corrected SRTM DEM product for vegetated areas[J]. Remote Sensing Letters, 2018,9(4):393-402.
- [17] Su Y, Guo Q, Ma Q, et al. SRTM DEM Correction in vegetated mountain areas through the integration of Spaceborne LiDAR, Airborne LiDAR, and Optical Imagery[J]. Remote Sensing, 2015,7(9):11202-11225.
- [18] 闫业超,张树文,岳书平.东北川岗地形区SRTM数据质量评价[J].中国科学院大学学报,2008,25(1):41-46. [Yan Y C, Zhang S W, Yue S P. Evaluation of SRTM data quality in area of undulating hills of northeast China[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2008,25(1):41-46.]
- [19] 马龙,李颖.从GTOPO30到SRTM DEM精度研究——以西藏为例[J].水土保持通报,2006,26(5):71-74. [Ma L, Li Y. Study on accuracy of GTOPO30 and SRTM DEM: A case study of Tibet[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006,26(5):71-74.]
- [20] 孙茜.SRTM数据精度检测[D].西安:长安大学,2010:1-51. [Sun Q. SRTM data accuracy detection[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010:1-51.]
- [21] 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. [Zhan L, Tang G A, Yang X. Evaluation of SRTM DEMs' elevation accuracy [J]. Geography and Geo-information Science, 2010,26(1): 34-36.]
- [22] 张锦明,游雄,万刚.DEM插值参数优选的试验研究[J].测绘学报,2014,43(2):178-185. [Zhang J M, You X, Wan G. Experimental research on optimization of DEM interpolation parameters[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014,43(2):178-185.]
- [23] 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 and Mapping, 2012, 37(4):167-170.]
- [24] Zwally H J, Schutz B, Abdalati W, et al. ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land [J]. Journal of Geodynamics, 2002,34(3):405-445.
- [25] 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):685-689. [Zhang Q, Yang Q K, Cheng J, et al. Characteristics of 3" SRTM errors in China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018,43(5):685-689.]
- [26] Zong J B, Ye Q H, Tian L D. Recent naimona'nyi glacier surface elevation changes on the Tibetan plateau based on ICESat/GLAS, SRTM DEM and GPS measurements[J]. Chinese Science Bulletin, 2014,59(21):2108-2118.
- [27] Zwally H J, Schutz B, Abdalati W, et al. ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land [J]. Journal of Geodynamics, 2002,34(3):405-445.
- [28] Yue T X, Wang S H. Adjustment computation of HASM: A high-accuracy and high-speed method[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010,24 (11):1725-1743.
- [29] Basaran M, Erpul G, Ozcan A U, et al. Spatial information of soil hydraulic conductivity and performance of cokriging over kriging in a semi-arid basin scale[J]. Environmental Earth Sciences, 2011,63(4):827-838.
- [30] Chatterjee S, Krishna A P, Sharma A P. Geospatial assessment of soil erosion vulnerability at watershed level in some sections of the Upper Subarnarekha river basin, Jharkhand, India[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 71(1):357-374.