DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.02.008

赵云龙, 符素华. 基于高分7号卫星 DEM 的坡度坡长计算精度评价[J].水土保持学报,2024,38(2):136-146.

ZHAO Yunlong, FU Suhua. Evaluation of the accuracy of extraction of slope and length based on DEM of GF-7 satellite[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2):136-146.

基于高分 7 号卫星 DEM 的坡度坡长计算精度评价

赵云龙, 符素华

(北京师范大学地理科学学部,北京 100875)

摘 要:[目的] 坡度和坡长作为重要的地形因子,其计算的准确性直接影响坡面土壤侵蚀模型的评价精度。高分 7 号卫星的高精度高程测量能力在地形因子的准确提取上具有较大潜力,期望能将其利用到坡度和坡长提取之中,实现对地形的准确表达。这需要对利用高分 7 号卫星 DEM 提取坡度坡长的结果进行精度评价。[方法] 利用地形因子(LS)计算工具,对陕西省吴堡县 4 个小流域高分 7 号卫星、1:10 000 地形图、激光雷达影像生成的 DEM 进行坡度、坡长的提取。采用相关系数(r)、相对偏差和绝对偏差作为评价指标,评价高分 7 号提取地形因子的精度。[结果] 与激光雷达和 1:10 000 地形图的坡度和坡长相比,高分 7 号提取的流域平均坡度偏低 7.50%~9.02%,坡长偏大 1.83%~19.35%,但坡长和坡度分级的面积比例并不存在显著差异;高分 7 号提取的坡度结果偏差 (16.46%~44.26%) 明显小于坡长的偏差 (75.25%~140.87%);高分 7 号所提取的坡度坡长在沟间地上的相对偏差(坡度 15.48%~56.63%,坡长 50.02%~130.79%)明显低于沟谷地(坡度 21.28%~63.61%,坡长 93.01%~192.51%)。[结论] 利用高分 7 号 DEM 提取坡度坡长时,对于获取坡长坡度面积分级和对指定点的坡度提取时是可行的,而对于指定点的坡长提取时则结果不够可靠,在研究流域中坡长坡度的空间分布上具有较大优势,而提取具体某一位置处的坡长坡度时的优势则不明显。

关键词: 高分7号; 地形因子; DEM; 土壤侵蚀模型

中图分类号:S157.3+9 文献标识码:A 文章编号:1009-2242-(2024)02-0136-11

Evaluation of the Accuracy of Extraction of Slope and Length Based on DEM of GF-7 Satellite

ZHAO Yunlong, FU Suhua

(Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] Slope and slope length are essential topographic factors, and their calculation accuracy directly affects the evaluation accuracy of slope soil erosion model. The high-precision elevation measurement capability of Gaofen -7 satellite has great potential in the accurate extraction of terrain factors, and it is expected that it can be used in the extraction of slope and slope length to achieve accurate expression of terrain. It is necessary to evaluate the accuracy of the results of slope length extraction using the DEM of Gaofen -7 satellite. [Methods] The slope and slope length of DEM generated by Gaofen -7 satellite, 1:10000 topographic map and LiDAR images in 4 small basins in Wubu County, Shaanxi Province were extracted by using the terrain factor (LS) calculation tool. Correlation coefficient (r), relative deviation (RE) and absolute deviation were used as evaluation indexes to evaluate the accuracy of extraction of topographic factors by Gaofen -7. [Results] Compared with the slope and slope length of LiDAR and 1:10000 topographic map, the average slope extracted by GF-7 was $7.50\% \sim 9.02\%$ lower, and the slope length was $1.83\% \sim 19.35\%$ larger. However, the area distributions of slope length and slope derived from the three data sources had no significant difference. Comparing the results of slope and slope length, the discrepancy in slope

收稿日期:2023-06-26 **修回**日

修回日期:2023-08-12

录用日期:2023-08-31

网络首发日期(www.cnki.net):2024-01-17

资助项目:国家自然科学基金项目(42177308)

第一作者:赵云龙(1999—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail;202121051020@mail.bnu.edu.cn 通信作者:符素华(1973—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail;suhua@bnu.edu.cn $(RE: 16.46\% \sim 44.26\%)$ derived from different sources is significantly lower than that $(RE: 75.25\% \sim 140.87\%)$ was slope length. The discrepancy between different sources was enhanced in gully areas $(RE \text{ of slope } 15.48\% \sim 56.63\%$, slope length: $50.02\% \sim 130.79\%)$, while being decreased in inter-gully areas $(RE \text{ of slope } 21.28\% \sim 63.61\%$, $RE \text{ of slope length } 93.01\% \sim 192.51\%)$. [Conclusion] It was feasible to obtain areal grading characters of slope or slope length and slope of specified locations using DEMs generated from Gaofen — 7 satellite, while the results of slope length for specified locations were less reliable. In conclusion, the Gaofen — 7 satellite had a great advantage in describing the spatial distribution of slope length and slope at the watershed scale, while being less capable of capturing slope length and slope at a specific site.

Keywords: GF-7; topographic factor; DEM; soil erosion models

Received: 2023-06-26 **Revised**: 2023-08-12 **Accepted**: 2023-08-31 **Online**(www.cnki,net): 2024-01-17

地形特征是影响侵蚀的关键因子之一,通用土壤流失方程(universal soil loss equation, USLE)和中国土壤流失方程(Chinese soil loss equation, CSLE)被广泛应用于坡面土壤侵蚀评价和水土保持规划的制定工作当中,模型中地形特征常用坡长与坡度进行量化计算。因此,对坡度和坡长的准确计算是进行侵蚀模拟和预报的关键。

在 USLE 和 CSLE 模型中计算地形时,坡面尺 度的坡度、坡长指标通常可以通过实测获取,而小流 域尺度上的坡度和坡长等地形因子指标通常来源于 2类:不同比例尺的地形图数据和不同分辨率的数字 高程模型(digital elevation model, DEM)。由于不 同比例尺的 DEM 包含的地形信息不同[1],因此,不 同数据源分辨率和质量的高低都影响地形计算精度。 针对不同比例尺的地形图,我国有学者[2-3]研究了黄 土丘陵沟壑区 1:10 000,1:25 000,1:50 000 和 1:100 000比例尺地形图在模拟地形上的差异,结果 显示,1:10 000 地形图对地形形态的反应能力和获 取的难易程度上综合来看最好。其中,TANG等[4] 和 YANG 等[5]研究发现,从 1:50 000 地形图计算 的坡度比从1:10 000 地形图计算的坡度要平缓,可 能是由于在制图综合过程中所导致的。针对不同分 辨率 DEM 对地形因子精度的影响,国内外学者[6-8] 主要针对 5~90 m 分辨率数据源做了大量的研究。 WANG 等[6]建立的基于直方图匹配的降尺度模型测 得 30 m 分辨率提取的地形因子(LS)相比 5 m 分辨 率的 LS 因子在高地势地区低估,低地势地区高估。 LU 等[7] 和 LI 等[8] 分别对不同比例尺地形图(1: 10 000,1:50 000)和不同分辨率的 DEM 进行 LS 因子的提取,LU等[7]认为,5个研究流域 LS 因子的 计算精度随着地形数据源的栅格分辨率的增大而下 降;而 LI 等[8] 发现,坡长和坡长因子随着 DEM 分辨 率的降低而被高估,且不同地貌的高估趋势相同;坡 度和坡度因子在所有地貌中,随着 DEM 分辨率的降 低都被低估。此外,需要注意的是,计算地形因子的 准确率不仅取决于栅格分辨率的精度,还取决于数据 的来源和地形的复杂性[9-13]。FU等[14] 曾提出,随着 DEM 栅格的增大,陡峭的坡度被低估,坡长因子被高 估。由此可知,采用不同分辨率的数据源计算坡长和 坡度具有一定的差异,因此在采用特定数据源进行地 形因子计算时,需要先对其精度进行评价。

高分7号卫星作为中国第一颗亚米级的高分辨 率对地观测遥感卫星,其高精度的高程测量能力被广 泛运用在我国的各个领域[15-17],在地形表达上有较大 的潜力。现有的研究主要集中在对其高程数据精度 评价与验证提高方面,谢俊峰等[18]对比分析3种校 验方法下高分7号的高程测量精度发现,其高程精度 能达到 0.157~0.800 m;李国元等[19]结合高精度外 业测量点和机载激光雷达数字表面模型(LiDAR-DSM)数据,对高分七号卫星激光测高标准产品开展 精度验证发现,高分七号 SLA03 产品定标区两波束 激光高程精度分别能达到 (0.018 ± 0.099) , (-0.017±0.096)m;SUN 等^[20]利用 LiDAR 数据验 证高分7号卫星激光测高数据在植被覆盖地区地面 高程精度发现,地面高程的均方根误差(RMSE)和平 均误差分别为 2.30,0.28 m; ZHU 等[21] 利用 3 种方 法处理高分7号立体影像得到3个DEM,并利用机 载激光雷达数据进行验证发现,GF-7立体图像生 成的 DEM 可以精确测量垂直和水平偏移量;伍煜 等[22]提出一种基于波形匹配的激光足迹地理定位的 方法,并利用机载激光雷达点云数据验证其测高精 度。可见,已有研究主要集中在高分7号 DEM 精度 评价上,还缺乏对利用高分7号 DEM 数据提取地形 因子进行精度评价的研究。

本研究拟采用高分 7 号卫星所获取的分辨率为 2.8 m 的 DEM 数据,计算陕西省吴堡县 4 个小流域 的坡度和坡长,并对其精度进行评价。在常用的不同比例尺地形图中,1:10 000(等高线间距为 5 m)地

形图对地形形态的反应能力与可获取的难易程度综合而言最优;而激光雷达作为现代对地观测的技术之一,具有空间与时间分辨率高、动态探测范围大、能够部分穿越树林遮挡、直接获取真实地表的高精度三维信息等特点[23],获取到的 DEM 精度更高。综上,选取 1:10 000 地形图数据和激光雷达获取的分辨率为 0.5 m 的 DEM 数据作为比较对象。研究结果可以丰富高分 7 号卫星 DEM 在地形因子提取精度方面的研究现状,从而为高分 7 号卫星数据在土壤侵蚀评价中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据基础

本研究区选取陕西省榆林市吴堡县的典型小流域,吴堡县($110^{\circ}32'32''-110^{\circ}47'04''E$, $37^{\circ}26'25''-37^{\circ}43'01''N$)位于黄土高原丘陵区,温带大陆性半干旱气候,海拔 $627\sim1~204~m$,年平均降水量475~mm,

主要集中在 7-9 月, 黄土土层深厚, 境内西北高、东南低, 丘陵起伏, 沟壑纵横, 河谷深切, 水土流失十分严重^[24]。本文主要选取寇嘉塬(KJY, 0.258 km²)、冯家堰(FJY, 0.191 km²)、张家山(ZJS, 0.154 km²)和任家庄(RJZ, 0.148 km²)4个小流域作为研究区(图 1)。

本试验使用的高分 7 号卫星 DEM 数据主要来自于自然资源卫星遥感云服务平台(www.sasclouds.com)下载的 2021 年 4 月原始影像,通过选择 2015 年生产的全国 2 m 分辨率数字正射影像作为控制底图和 30 m 格网间距的 DEM 作为参考后进行同名点采集与优化,最后生成 DEM。1:10 000 地形图数据由中国国家测绘局提供。机载激光雷达数据于 2022年 5 月 17—18 日采集,坐标系为 CGCS2000,高程系统为 85 黄海高程系,点云空间分辨率为 0.11 m, DEM 分辨率为 0.5 m。

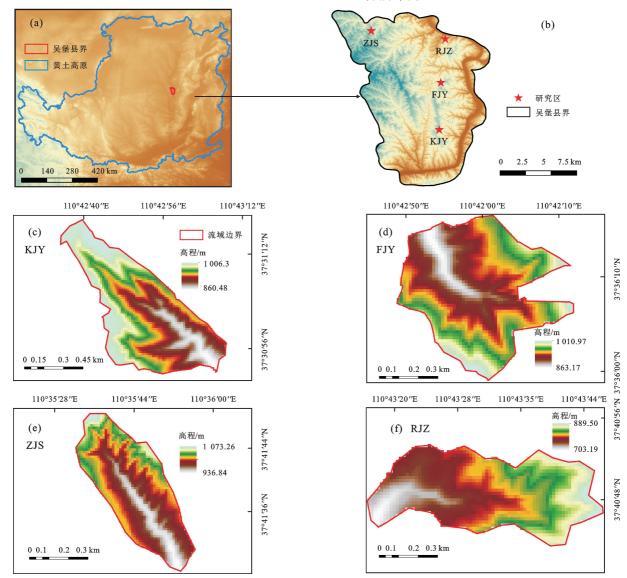


图 1 研究区范围及基本信息

Fig. 1 Location and DEMs of the four catchments http://stbcxb.alljournal.com.cn

1.2 数据处理与地形提取

在土壤侵蚀评价中,常用的栅格分辨率为 10 m, 对于由 1:10 000 地形图生成的数字高程模型 (DEM),使用 Raster 2 vector for Windows 软件对等 高线进行数字化处理,之后利用软件 ArcGIS 10.2,通 过"ArcToolbox/3D Analyst Tools/Raster Interpolation/ Topo to Raster"命令将其转换为分辨率为 10 m的 DEM。对于高分7号卫星数据和激光雷达数据 的 DEM,则通过重采样到相同的分辨率后,提取坡长 和坡度。为保证3个数据源 DEM 的范围的一致性 和栅格空间位置的绝对对应,首先利用 ArcGIS 10.2 中"Georeferencing"工具对 3 种数据源进行影像配 准。选择各数据源栅格图层中沟道与沟道交汇点作 为控制点,建立点矢量文件,以此作为后续相关 DEM 栅格与坡度坡长栅格影像配准的控制点,以激光雷达 的栅格作为基准,利用"Rectify"命令将其余栅格图 层的通过平移变换进行配准并另存为 TIF 栅格文 件。利用"ArcToolbox/Data Management Tools/ Raster/Raster/Raster Processing/Clip"命令对配准 后各数据源的 DEM 的 TIF 栅格文件进行裁剪,裁剪 时利用同一流域边界矢量文件,并在"Environment settings"中的"Processing Extent/Snap raster"均选择对应 流域的激光雷达的 DEM 作为基准进行栅格对齐。

后续利用得到的 DEM 进行坡度坡长的计算和提取时,采用符素华等^[25]开发的 LS 计算工具软件。其中,坡度的计算采用的是最大坡降法。针对每个 DEM 数据 栅格,其周围的栅格中最多含有 8 个方向,某一栅格的坡度值即以该栅格为中心的 3 m×3 m 栅格范围内,中心栅格与周围 8 个方向中最大坡降方向的坡度值。

坡长的定义为从坡面径流起点至坡面洼地或沟 道间的水平距离,一般取分水岭上1点作为坡长的起 点。坡长的计算包括的过程为[26]:(1)填洼。为消除 DEM 中存在的高程低于周围栅格的低洼点在计算水 流方向时无法计算的影响,将其填平为其周围最低点 的高程。(2)计算单元格的流向。同样采用最大坡降 法,以每个栅格最大坡降的方向为水流方向。(3)计 算单一栅格的非累计坡长(non-cumulative slope length, NCSL)(公式 1),即计算单一栅格单元在水 流方向上的长度(其中 Δx 为栅格大小)。其中,局部 高程点是指无其他栅格单元的水流流入,或有其他栅 格单元的水流流入,但与入流单元之间坡度为零的栅 格单元。(4)计算栅格累计坡长。根据水流方向,对 流入某一栅格的上游栅格的非累计坡长进行累加,若 存在多条水流路径,则取最长流路的累计坡长作为当 前栅格的坡长。

$$x = \begin{cases} \Delta x (局部高程点) \\ \Delta x (水流方向与栅格单元方向平行或垂直) \\ \sqrt{2} \Delta x (水流方向为栅格单元对角线方向) \\ 1 + \sqrt{2} \Delta x (其他情况) \end{cases}$$
 (1)

1.3 统计方法与对比验证

为了判断 3 种数据源提取得到的坡度和坡长是 否具有相关性,利用 SPSS 软件计算两两数据源之间 的 Pearson 相关系数(r)。

$$r = \frac{\sum (x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \overline{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \overline{y})^2}}$$
(2)

式中:r 为 Pearson 相关系数; x_i 、 y_i 分别为不同数据源对同一栅格的坡度或坡长的提取值;x、y 分别为所有栅格的平均值。

将高分 7 号数据的各栅格点所提取到的坡度和坡长值分别同激光雷达、1:10 000 地形图数据获取的坡度和坡长值进行比较,并统计绝对偏差 AE(公式3),相对偏差 RE(公式4),从而判断高分 7 号卫星数据对于坡度和坡长的提取精度,且考虑不同地形部位对结果的影响。

$$AE = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\mid x_i - y_i \mid)}{n}$$
 (3)

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{|x_i - y_i|}{y_i} \right)}{n} \times 100\%$$
 (4)

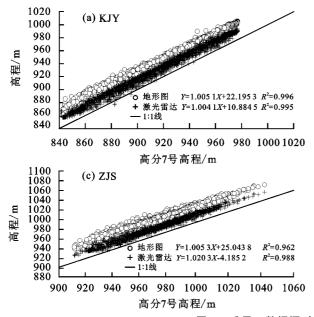
式中: x_i 、 y_i 为不同数据源对同一栅格的坡度或坡长的提取值。其中绝对偏差单位同 x_i 和 y_i 的单位,相对偏差的单位为%。再以 2° 和 20 m 为组间距对 3 种数据源的坡度、坡长结果进行统计,对比不同数据源得到的坡度、坡长分布状况,其中, $0\sim20$ m 的坡长包括沟道(中断点)和分水岭(局部高程点)坡长值,并对同一流域不同坡度坡长分布的面积比例进行配对 t 检验。

最后,为了更加直观展现3种数据源提取结果的差异,分析导致差异的原因,利用软件ArcGIS10.2,通过"3D Analyst Tools/Raster Surface/Counter"将高分7号卫星和激光雷达得到的DEM生成等高线,等高线间距设为10m;将3条等高线叠加显示在激光雷达获取的研究区遥感影像上,对比分析高分7号与1:10000地形图和激光雷达数据产生差异的具体部位及高程变化程度,判断计算精度是否受地貌部位影响。根据激光雷达的影像数据,提取沟缘线边界,将坡面分为沟间地和沟谷地。

2 结果与分析

2.1 DEM 相关性以及坡长坡度空间分布格局

图 2 为高分 7 号提取的 DEM 分别与地形图和 激光雷达得到的 DEM 之间的相关性。结果显示,高



分 7 号提取的 DEM 与另外两者提取的 DEM 都具有较好的相关关系($R^2 = 0.956 \sim 0.998$),但是高分 7 号的 DEM 均整体偏低(流域平均高程值较地形图低 $2.85\% \sim 3.89\%$,较激光雷达低 $1.57\% \sim 2.03\%$)。

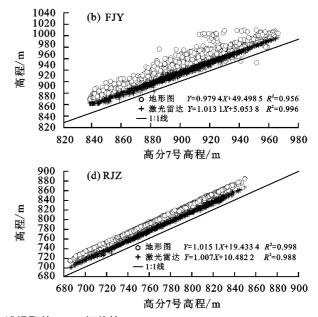


图 2 采用三数据源对不同流域提取的 DEM 相关性

Fig. 2 The correlations between DEMs derived from GF-7 satellite and those from other two data sources in the four catchments

利用 LS 计算工具提取得到 3 种数据源的坡度 坡长后,对高分 7 号得到的在 4 个流域中的坡长坡度 的空间分布格局进行分析。从图 3 可以看到,接近分 水岭的梁峁区坡度较小,而靠近沟道的区域坡度较

大,此结果与黄土高原的实际地形特征较为吻合。流域中较大坡长的分布呈现出树枝状,侵蚀沟中的坡长以大坡长为主,梁峁区的坡长则较短,这能较好地体现水流挟带泥沙向沟道汇集的特点(图 4)。

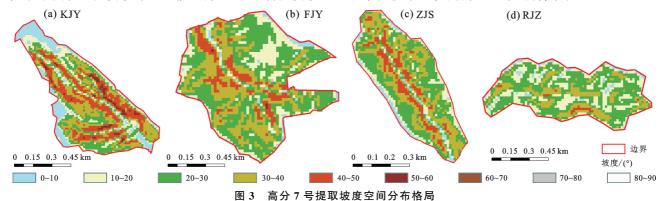


Fig. 3 The spatial distribution of slope based on DEMs derived from GF-7satellite for the four catchments

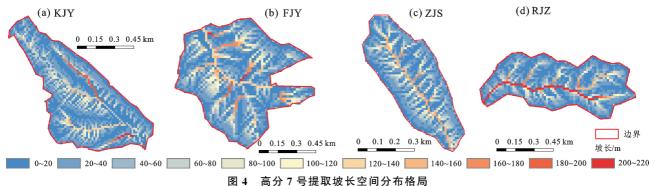


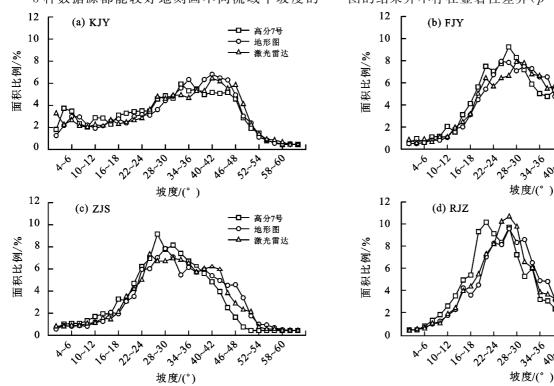
Fig. 4 The spatial distribution of slope length based on DEMs derived from GF-7satellite for the four catchments http://stbcxb.alljournal.com.cn

地形图

2.2 坡度提取精度评价

基于高分7号提取的坡度结果和地形图与激光 雷达都具有显著的相关性(p < 0.001),相关系数分别 为 0.82,0.80,此结果与地形图和激光雷达之间的相 关性(r=0.804)也较为接近。利用3种数据源计算 得到的流域平均坡度范围为 27°~31°,其中高分 7 号 的结果相较于激光雷达和地形图偏小 7.50%~ 9.02% (p < 0.001)

3种数据源都能较好地刻画不同流域中坡度的



The curve of slope distributions generated from different data sources in the four catchments

http://stbcxb.alljournal.com.cn

不同流域 3 种数据源计算的坡度分布面积比例曲线

在全流域尺度,与1:10 000 地形图相比,高分7 号在 4 个小流域中对于坡度提取的相对偏差(RE)为 16.46%~23.66%,平均值为21.20%,明显低于高分 7号与激光雷达的差异(RE 为 20.99%~42.26%,平 均值为32.25%)(表1)。由此可见,高分7号与地形 图对坡度的提取结果一致性较强。另一方面,不同数 据源提取坡度的偏差在各流域中不同的地形部位表 现出明显的差异。除 KJY 外,不同数据源在剩下 3 个流域中均在沟间地的差异较小(RE 为 15.48%~ 20.85%),而在沟谷地的差异较大(RE 为 17.53%~ 63.61%)。其中 FJY 的不同地形部位对高分 7 号和 激光雷达之间的差异影响最大,在沟间地二者之间的 偏差为17.85%,仅为沟谷地偏差的28.06%。以绝对 偏差(AE)来刻画不同数据源的坡度结果的差异,其 规律与相对偏差的结果基本一致。尽管 KJY 流域的 AE 和 RE 在不同地形部位显示出相反的规律,但其

中 AE 结果也同样揭示不同数据源在沟间地的差异

基于高分7号提取的坡长结果和地形图与激光 雷达的相关系数分别为 0.395, 0.278, 此结果明显低 于地形图和激光雷达之间的相关性(r=0.804)。利 用 3 种数据源计算得到的流域平均坡长范围为 35.04~41.82 m,其中高分7号的结果相较于激光雷 达和地形图偏大 $1.83\% \sim 19.35\% (p < 0.001)$ 。

各流域的坡长(>20 m)分布都基本遵循面积占 比随着坡长的增加呈现先剧烈递减、后逐渐平稳的趋 势(图 6)。此外,ZJS和RJZ的大坡长分布部分的小 峰值,系软件提取坡长时,将主沟道处的第1个栅格 的坡长值赋值为后续主沟道栅格中坡长,同时沟道中 坡长不再累计,均等于沟道第1个栅格的累计坡长值。 这导致某一大坡长值的栅格数量增加,在图中形成一 小峰值,实际中并不在坡面上存在如此大的坡长。

基于激光雷达提取的 0~20 m 坡长明显多于其他 2个数据源,这表明采用激光雷达数据更容易达到坡 长中断条件。3种数据源的坡长结果在不同流域分布 状况存在明显差异。如在 KJY 和 FJY, 高分 7 号和地 形图提取的中等坡长(40~160 m)比例分别为 42%和 50%,均明显高于激光雷达(33%)。而在 ZJS 和 RJZ, 不同数据源的差异主要体现在对大坡长(即截断于主 沟道的坡长)的提取。其中高分7号、地形图和激光雷 达在 ZJS 提取的沟道坡长分别为148.98,180.35,86.21 m, 而在 RIZ 提取的沟道坡长分别为 232.77, 178.29, 184.49 m。由此可见,利用高分7号提取坡长时不容 易出现坡长中断的情况,因此更容易提取较大的沟道 坡长。尽管基于3种数据源的流域坡长提取结果具有 一定差异,但高分7号提取的坡长分级与激光雷达和 地形图的分级面积比例并不存在显著性差异(p> 0.824)

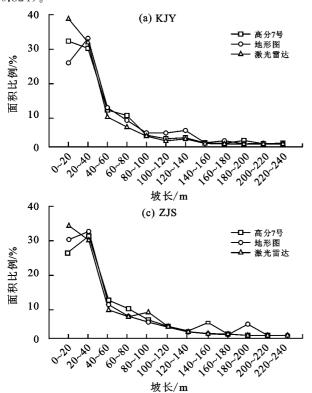


表 1 3 个数据源 DEM 提取的坡度结果差异比较

Table 1 Comparison of slope results extracted from three data sources DEM

流域	地形部位	高分7号-	高分7号-	高分7号-	高分7号-
		地形图 RE®	激光雷达 REb	地形图 AE ^c	激光雷达 AEd
КЈҮ	全流域	23.66	44.26	5.04	5.14
	沟间地	24.97	56.63	4.07	4.81
	沟谷地	22.13	29.80	6.18	5.53
FJY	全流域	16.46	39.21	4.47	5.83
	沟间地	15.48	17.85	3.96	4.57
	沟谷地	17.53	63.61	5.06	7.24
ZJS	全流域	21.28	24.55	5.94	5.63
	沟间地	19.89	16.12	5.03	3.75
	沟谷地	22.18	30.04	6.53	6.85
RJZ	全流域	23.43	20.99	5.81	5.26
	沟间地	20.85	18.31	5.27	4.74
	沟谷地	25.80	23.46	6.30	5.73

注:a表示高分7号和1:10000地形图坡度结果的相对偏差(%);b表示高分7号和激光雷达坡度结果的相对偏差(%);c表示高分7号和1:10000地形图坡度结果的绝对偏差(°);d表示高分7号和激光雷达坡度结果的相对偏差(°)。

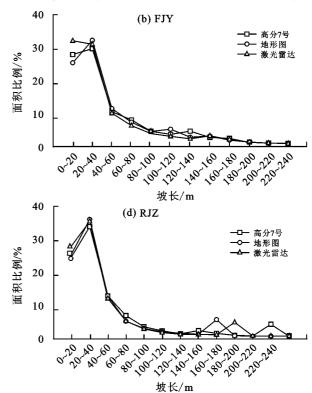


图 6 不同流域中 3 个数据源提取的坡长分布面积比例曲线

Fig. 6 The curve of slope lenths distributions generated from different data sources in the four catchments

不同数据源提取的坡长结果差异(RE)明显大于坡度(表 2)。其中,在全流域范围高分 7 号和地形图的差异为 75.25%~117.59%,低于其与激光雷达的差异(94.47%~140.26%)。各数据源对坡长提取的差异在不同的地形部位的表现与坡度结果一致,即各数据源的坡长偏差在沟间地较低,仅为在沟谷地的25.98%~85.58%。

3 讨论

坡长和坡度因子作为重要的地形因子,其乘积 (LS 因子)被用于 USLE 模型中来量化地形对土壤流失的影响。已有研究^[4,27]表明,地形图比例尺尺度和 DEM 的分辨率是坡度坡长计算结果的重要影响因素。一般而言,地形图的比例尺越大,地形的表征越详细^[28-29]。反之,一些沟谷和地形起伏被平滑或完

全消失[4-5-30]。因此,沟谷地的坡度随地图比例尺的变化而剧烈变化。WANG等[31] 对以往相关研究中的采用的 DEM 分辨率和比例尺进行统计显示,最常用的分辨率和比例尺分别为 30 m 和 1:50 000。高分 7号作为我国首颗亚米级分辨率对地观测卫星,其获取的影像生成的 DEM 数据能达到 2.8 m 的分辨率,明显优于常用的 DEM 数据,若是能将其运用于土壤侵蚀模型中的坡长坡度提取中,将有利于提高模型的准确度。因此,本文以 1:10 000 地形图和具有较高空间分辨率的激光雷达数据作为参考,分析高分7号对地形因子的刻画效果,以期为土壤侵蚀模拟过程中的数据选择提供依据。

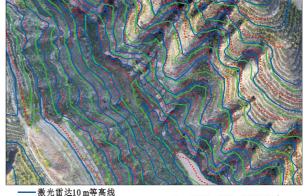
表 2 3 个数据源 DEM 提取的坡长结果差异比较
Table 2 Comparison of slope length results extracted from
DEM from three data sources

地形部位	高分7号-	高分7号-	高分7号-	高分7号-
	地形图 RE®	激光雷达 REb	地形图 AEc	激光雷达 AEd
全流域	75.25	94.47	23.08	19.74
沟间地	59.93	70.32	15.24	12.02
沟谷地	93.01	123.47	32.08	26.36
全流域	86.95	140.87	26.35	35.30
沟间地	81.16	130.79	18.42	25.14
沟谷地	94.28	152.82	35.40	44.32
全流域	117.59	140.26	26.14	28.54
沟间地	80.30	96.48	14.25	14.57
沟谷地	141.87	168.77	33.17	37.37
全流域	115.83	124.15	30.42	29.60
沟间地	50.04	50.02	9.88	9.73
沟谷地	176.50	192.51	49.37	47.69
	全沟沟全沟沟全沟沟全沟沟全沟流间谷流间谷流间谷流间谷流间谷流间谷流间	地形部位 地形图 RE* 全流域 75.25 沟间地 59.93 沟谷地 93.01 全流域 86.95 沟间地 81.16 沟谷地 94.28 全流域 117.59 沟间地 80.30 沟谷地 141.87 全流域 115.83 沟间地 50.04	地形部位 地形图 RE* 激光雷达 RE* 全流域 75.25 94.47 沟间地 59.93 70.32 沟谷地 93.01 123.47 全流域 86.95 140.87 沟间地 81.16 130.79 沟谷地 94.28 152.82 全流域 117.59 140.26 沟间地 80.30 96.48 沟谷地 141.87 168.77 全流域 115.83 124.15 沟间地 50.04 50.02	地形部位 地形图 RE® 激光雷达 RE® 地形图 AE® 全流域 75.25 94.47 23.08 沟间地 59.93 70.32 15.24 沟谷地 93.01 123.47 32.08 全流域 86.95 140.87 26.35 沟间地 81.16 130.79 18.42 沟谷地 94.28 152.82 35.40 全流域 117.59 140.26 26.14 沟间地 80.30 96.48 14.25 沟谷地 141.87 168.77 33.17 全流域 115.83 124.15 30.42 沟间地 50.04 50.02 9.88

注:a表示高分7号和1:10000地形图坡长结果的相对偏差(%);b表示高分7号和激光雷达坡长结果的相对偏差(%);c表示高分7号和1:10000地形图坡长结果的绝对偏差(m);d表示高分7号和激光雷达坡长结果的相对偏差(m)。

DEM 是地形提取的基础,其数值和分布特征将 直接影响因子计算结果。本研究发现,高分7号 DEM 相较于其他 2 个数据源 DEM 普遍偏低,这种 系统偏差在其他研究中也多有发现。如 HIRT 等[32] 报告 ASTER 与 GCP(ground control point)相比低 估地形高程;LI等[33]和 ZHAO等[34]证实 SRTM 与 GCP相比高估地形高程。出现这种系统性偏差可能 是在通过影像或地形图生成 DEM 时选取的参考点 不同导致的。邹馨等[35]指出,利用高分7号影像提 取 DEM 时,参考点的分布与数量显著影响 DEM 的 值域。而本文利用高分7号影像生成 DEM 时选取 30 m 格网间距的 DEM 作为参考,该参考系与 1: 10 000地形图以及激光雷达选取的参考系之间的差 异是导致高分7号 DEM 高程整体低于其余二者的 主要原因。但根据本文中坡度坡长计算方法(公式 1)可知,坡长的计算依赖于坡度,而坡度的计算结果 主要取决于相邻栅格相对高程的差异,这表明高程系统的偏大或者偏小对坡度结果的影响较小。在本研究中,尽管高分7号的高程值整体小于1:10000和激光雷达的结果,但三者的相关性极高($r^2 > 0.956$)。此结果说明3种数据源提取的高程值在流域尺度具有高度一致的分布特征,因此不同数据源之间高程值的绝对偏差并不对坡长坡度计算结果产生显著影响。

进一步探究坡度坡长产生差异的可能原因,将3 个数据源提取得到的 DEM 数据生成间距为 10 m 的 等高线绘制于激光雷达获取的影像上(图 7),可以看 出,3条等高线在西侧的坡面上重叠性较好,差异较 小,而在东北侧的坡面上则产生差异,具体表现为高 分7号生成的等高线在沟底部更加平滑,沟间地上高 分7号与激光雷达和1:10 000 地形图的重叠度较 好,但是在遇到沟谷时高分7号与其余2个等高线重 叠性不如激光雷达与 1:10 000 地形图二者的等高 线重叠度高,具体表现为激光雷达对于沟谷的描绘最 为准确,其次为1:10 000 地形图,最后是高分7号。 由此说明,高分7号的 DEM 数据往往省略更多的地 形细节,使得等高线的变化更平缓;这反映高分7号 在遇到沟谷和山脊时,其精度受到影响,从而呈现出 高分7号影像的 DEM 计算的坡度、坡长面积比例在 沟谷地上与 1:10 000 地形图、激光雷达的 DEM 计 算的面积比例相差较大,而在沟间地上相差较小的情 况。汤国安等[36]利用黄土高原6个典型地貌区提出 的地面平均坡度误差与栅格分辨率以及沟壑密度之 间的量化关系式,也表明坡度的误差与沟壑密度之间 呈现正相关关系; GAO 等[37] 也指出, 在海拔变化较 小时的地形可以表现得更准确,不同分辨率 DEM 的 生成的地形图结果差异较小。而在文中的沟谷地中, 正是高程变化剧烈的部位,地形图的差异也大,与上 述研究结果具有一致性。



0 0.025 0.05 0.075 0.1 km

图 7 高分 7 号与 1:10 000 地形图等高线对比

Fig. 7 Comparison of contour lines between GF-7, LiDAR and $1:10\ 000$ topographic map

针对在 KJY、FJY 流域中出现的高分 7 号同 1: 10 000 地形图数据提取的沟间地坡度相对偏差与激光雷达数据相对偏差较大的情况,系该 2 个流域中存在的个别点由 1: 10 000 地形图提取的坡度接近于0,而激光雷达提取的坡度不为 0 所导致,将差异过大(相对偏差>2 000%)的数据剔除后进行统计,得到的高分 7 号与激光雷达提取的 KJY 全流域坡度差异为 26.85%,沟间地差异与沟谷地差异分别为 30.10%和 23.14%;剔除后 FJY 坡度相对差异分别为 22.00%(全流域),22.68%(沟间地)和 20.11%(沟谷地)。

关于在地形变化剧烈处之所以导致坡长的提取差异大于坡度的原因,初步判断是由于坡长对地形的变化更为敏感。在坡度的计算时,不考虑水流流路的路径和长度,而坡长的提取过程,需要通过考虑坡度的变化判断水流流路的路径,从而得到坡长,因此,坡

度的微小变化均可能导致坡长产生剧烈的变化。WANG等^[6]提出,如果 DEM 表面包含更多的高空间频率信息(较大的山谷、沟壑和丘陵),统计坡度的变化将更加剧烈;LU等^[7]也提出,在东北地区的流域中,地形受到栅格大小的影响小于其余 4 个更崎岖的流域,主要是由于东北地区的流域的坡缓而长。而黄土高原地区沟壑纵横,高频率信息多,坡度陡峭,对坡度的影响较大,同时也影响坡长的计算。以 ZJS 流域为例,流域中具有较大差异的坡长主要来自于沟谷部分(图 8)。

微小坡度的变化引起水流流路出现中断或者改向;除此之外,相对平滑的等高线,更容易得到较长的水流流路,使得坡长的提取结果中出现更大的坡长,从而使得结果中体现出坡长的提取差异较坡度更为明显。

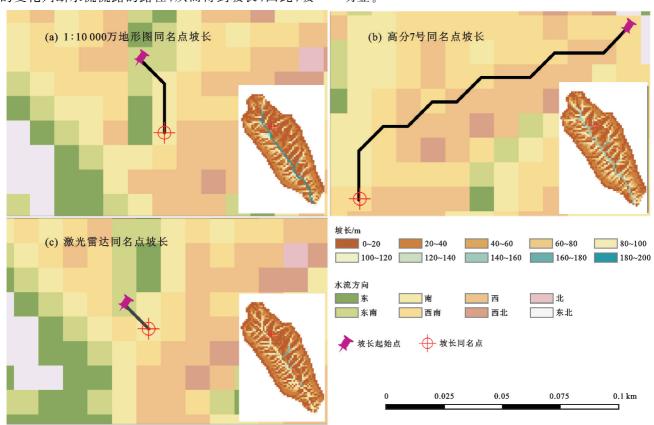


图 8 3 数据源条件下同一点水流路径对比

Fig. 8 Comparison of water flow paths at the same point generated from three data sources

由此可知,坡度的提取精度在 3 m×3 m的栅格范围内受到微小的 DEM 变化的影响较小;而坡长的提取受到坡度提取精度的影响,微小坡度的变化则导致水流路径的改变,从而使水流流路的长度发生变化,坡长也随之改变,所以坡长的偏差也相对坡度变得过大。

4 结论

(1)3 个数据源的高程数据具有极强的相关性 (相关系数 r > 0.956)。基于不同数据源的地形因子 提取结果显示,与地形图和激光雷达相比,高分 7 号

提取的流域平均坡度偏低 $7.50\% \sim 9.02\%$, 坡长偏大 $1.83\% \sim 19.35\%$, 但分组坡长和坡度的面积分布并不存在显著差异。

(2)对比地形图和激光雷达,高分 7 号提取的坡度结果偏差 $(16.46\% \sim 44.26\%)$ 明显小于坡长的偏差 $(75.25\% \sim 140.87\%)$;同时,高分 7 号与地形图的差异(坡度 21.20%,坡长 98.90%)略小于其与激光雷达的差异。

(3)对比地形图和激光雷达,高分7号在沟间地

的坡度和坡长结果偏差分别为 $15.48\% \sim 56.63\%$ 和 $50.02\% \sim 130.79\%$,明显低于其在沟谷地与其他数据源的偏差(坡度: $21.28\% \sim 63.61\%$;坡长: $93.01\% \sim 192.51\%$)。

综上所述,高分 7 号 DEM 数据在坡度坡长的提取上的应用还具有一定的限制,对于实际生产中获取某一区域的坡长坡度分级的面积比例时,具有较好的准确性;当需要对某一具体的地形部位进行逐一的坡度坡长提取时,高分 7 号在坡度上的精度能满足需求,但在坡长上的精度还不够可靠。因此,高分 7 号在研究对流域中坡长坡度的空间分布上是具有较大优势的,而研究对具体某一位置处的坡长坡度提取时的优势则不明显。

参考文献:

- [1] 陈楠,汤国安,刘咏梅,等.基于不同比例尺的 DEM 地形信息比较[J].西北大学学报(自然科学版),2003,33(2): 237-240.
 - CHEN N, TANG G A, LIU Y M, et al. Comparison of topographic of DEM with different scales[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2003, 33(2):237-240.
- [2] 王书源.地形数据源对地形因子计算的影响[D].北京: 北京师范大学,2016.
 - WANG S Y. Effect of different topographic data sources on LS factor calculation [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2016.
- [3] 高云飞,李智广,杨胜天,等.黄河粗泥沙集中来源区区域地形因子比较研究[J].水土保持通报,2012,32(1): 112-114.
 - GAO Y F, LI Z G, YANG S T, et al. Comparative study for regional terrain factors in coarse sand source area of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(1):112-114.
- [4] 汤国安,杨勤科,张勇,等.不同比例尺 DEM 提取地面坡度的精度研究:以在黄土丘陵沟壑区的试验为例[J].水土保持通报,2001,21(1):53-56.
 - TANG G A, YANG Q K, ZHANG Y, et al. Research on accuracy of slope derived from DEMs of different map scales[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001,21(1):53-56.
- [5] 杨勤科,李锐,梁伟.区域水土流失地形因子的地图学分析[J].水土保持研究,2006,13(1):56-58. YANG Q K, LI R, LIANG W. Cartographic analysis on terrain factors for regional soil erosion modelling [J].

Research of Soil and Water, 2006, 13(1):56-58.

[6] WANG C M, SHAN L X, LIU X, et al. Impacts of horizontal resolution and downscaling on the USLE LS factor for different terrains [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2020, 8(4):363-372.

- [7] LUSJ, LIUBY, HUYX, et al. Soil erosion topographic factor (LS): Accuracy calculated from different data sources[J].Catena, 2020, 187: e104334.
- [8] LI A, ZHANG X C, LIU B Y. Effects of DEM resolutions on soil erosion prediction using Chinese Soil Loss Equation[J].Geomorphology,2021,384:e107706.
- [9] GERTNER G, WANG G, FANG S, et al. Effect and uncertainty of digital elevation model spatial resolutions on predicting the topographical factor for soil loss estimation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002,57:164-174.
- [10] LIU H H, KIESEL J, HORMANN G, et al. Effects of DEM horizontal resolution and methods on calculating the slope length factor in gently rolling landscapes[J].Catena, 2011, 87:368-375.
- [11] 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.
- [12] OLIVEIRA PTS, RODRIGUES DBB, SOBRINHO TA, et al. Use of SRTM data to calculate the (R) USLE topographic factor[J]. Acta Scientiarum. Technology, 2013, 35(3):507-513.
- [13] SHAN L X, YANG X H, ZHU Q G Z. Effects of DEM resolutions on LS and hillslope erosion estimation in a burnt landscape[J]. Soil Research, 2019, 57(7): 797-804.
- [14] FUSH, CAOLX, LIUBY, et al. Effects of DEM grid size on predicting soil loss from small watersheds in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73: 2141-2151.
- [15] TANG X M, XIE J F, LIU R, et al. Overview of the GF-7 laser altimeter system mission [J]. Earth and Space Science, 2020, 7(1): e2019 EA000777.
- [16] 高小明,李国元,郭金权,等.发展三极观测激光测高卫星的探讨[J].红外与激光工程,2020,49(11):40-46. GAO X M, LI G Y, GUO J Q, et al. Discussion on the development of laser altimetry satellite for tri-polar regions observation[J].Infrared and Laser Engineering, 2020,49(11):40-46.
- [17] 唐新明,刘昌儒,张恒,等.高分七号卫星立体影像与激光测高数据联合区域网平差[J].武汉大学学报(信息科学版),2021,46(10):1423-1430.

 TANG X M, LIU C R, ZHANG H, et al. GF-7 satellite stereo images block adjustment assisted with laser altimetry data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(10):1423-1430.
- [18] 谢俊峰,刘仁,王宗伟,等.高分七号星载激光测高仪在 轨几何检校与精度评估[J].红外与激光工程,2021,50 (8):195-205.

- XIE J F, LIU R, WANG Z W, et al. In-orbit geometric calibration and accuracy evaluation of GaoFen-7 spaceborne laser altimeter [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(8):195-205.
- [19] 李国元,唐新明,陈继溢,等.高分七号卫星激光测高数据处理与精度初步验证[J].测绘学报,2021,50(10): 1338-1348.
 - LIGY, TANGX M, CHENJY, et al. Processing and preliminary accuracy validation of the GF-7 satellite laser altimetry data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(10); 1338-1348.
- [20] SUN Y, NIE S, LI G Y, et al. Evaluation of the performance of GaoFen-7 laser altimeter data for ground elevation retrieval over vegetated areas [J]. Remote Sensing Letters, 2022, 13(10):991-1001.
- [21] ZHU X X, REN Z K, NIE S, et al. DEM generation from GF-7 satellite stereo imagery assisted by space-borne LiDAR and its application to active tectonics[J]. Remote Sensing, 2023, 15(6); e1480.
- [22] 伍煜, 王恒, 韩启金, 等. 基于波形匹配的高分七号星载激光测高仪山地区域脚点定位方法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(6):1051-1061.
 WU Y, WANG H, HAN Q J, et al. A waveform matching-based method of improving laser footprint geolocation for GaoFen-7 spaceborne laser altimeter in mountainous areas [J]. Journal of Infrared and

Millimeter Waves, 2022, 41(6):1051-1061.

- [23] 周淑芳,李增元,范文义,等.基于机载激光雷达数据的 DEM 获取及应用[J].遥感技术与应用,2007,22(3): 356-360.

 ZHOU SF, LI ZY, FAN WY, et al. DEM extraction and its application based on airborne lidar data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22 (3): 356-360.
- [24] 李宝琴.对吴堡县淤地坝建设的认识和建议[J].农业灾害研究,2015,5(4):50-55.

 LI B Q. Understanding and proposal of warp land dam construction in Wubu County [J]. Journal of Agricultural Catastrophology,2015,5(4):50-55.
- [25] 符素华,刘宝元,周贵云,等.坡长坡度因子计算工具[J].中国水土保持科学,2015,13(5):105-110. FUSH, LIUBY, ZHOUGY, et al. Calculation tool of topographic factors[J]. Science of Soil and Water Conservation,2015,13(5):105-110.
- [26] 曹龙熹,符素华.基于 DEM 的坡长计算方法比较分析 [J].水土保持通报,2007,27(5):58-62. CAO L X, FU S H. A comparison of methods for computating slope length based on DEM[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2007,27(5):58-62.
- [27] 高杨,吕宁,薛重生,等.不同比例尺数字高程模型对土壤侵蚀强度分级的影响[J].中国水土保持,2007(10):26-28.

- GAO Y, LV N, XUE C S, et al. Influence of digital elevation model with different scales to the graded intensity of soil erosion[J]. Soil and Water Conservation in China, 2007(10): 26-28.
- [28] UUEMAA E, ROOSAARE J, MANDER Ü. Scale dependence of landscape metrics and their indicatory value for nutrient and organic matter losses from catchments[J]. Ecological Indicators, 2005, 5(4):350-369.
- [29] REN S M, YIN L, BO S. Research on sensitivity for soil erosion evaluation from DEM and remote sensing data source of different map scales and image resolutions[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10(PB):1753-1760.
- [30] BROWNE L C, WILSON L. Evaluating inputs to models of hominin raw material selection: Map resolution and path choices[J].Journal of Archaeological Science, 2013, 40 (11); 3955-3962.
- [31] WANG S Y, ZHU X L, ZHANG W B, et al. Effect of different topographic data sources on soil loss estimation for a mountainous watershed in Northern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75:1-12.
- [32] HIRT C, FILMER S M, FEATHERSTONE E 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.
- [33] LI P, SHI C, LI Z H, et al. Evaluation of ASTER GDEM using GPS benchmarks and SRTM in China [J].International Journal of Remote Sensing, 2013, 34 (5):1744-1771.
- [34] ZHAO G S, XUE H P, LING F. Assessment of AS-TER GDEM performance by comparing with SRTM and ICESat/GLAS data in Central China[C]. International Conference on Geoinformatics, IEEE, 2010.
- - ZOU X, LIU J, ZHANG J, et al. DEM extraction and accuracy evaluation based on GF-7 stereo image pairs[J].Jiangxi Science, 2022, 40(3):502-507.
- [36] 汤国安,赵牡丹,李天文,等.DEM 提取黄土高原地面 坡度的不确定性[J].地理学报,2003,58(6):824-830. TANG G A, ZHAO M D, LI T W, et al. Uncertainty in slope extracted based on DEMs on the Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2003,58(6): 824-830.
- [37] GAO J. Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 11 (2):199-212.