DOI:10.14075/j.jgg.2024.09.458

文章编号:1671-5942(2025)10-1013-07

DEM 对 SBAS-InSAR 形变监测和几何畸变识别的影响分析

张卓普[1]　张晨晰[1]　于志刚[1]　张光辉[1]　杨　绪[1]　刘春雨[1]

1　山东科技大学资源学院,山东省泰安市岱宗大街 223 号,271000

摘　要:以山东中部丘陵露天矿区为研究区域,在对比 SRTM-1、SRTM-3、ALOS-DEM、ASTER-GDEM 和 LiDAR-DEM 高程精度的基础上,分析不同 DEM 及 DEM 的高程精度和空间分辨率对 SBAS-InSAR 形变监测效果和几何畸变识别的差异。结果表明,相较于空间分辨率,DEM 的高程精度在形变监测中起到了更为关键的作用,是影响监测精度的重要因素;同时,DEM 的高程精度与空间分辨率均会对阴影、叠掩区域的识别产生显著影响。本文结果为后续在复杂地形中进行时序形变监测提供了 DEM 数据选择的支持。

关键词:SBAS-InSAR;DEM;露天矿;几何畸变;形变精度

中图分类号:P237　　**文献标识码**:A

在利用小基线集干涉测量技术(SBAS-InSAR)进行地表形变监测时,需借助外部参考数字高程模型(DEM)数据来去除地形相位误差。尽管在 SBAS-InSAR 数据处理流程中可通过时间序列信息和模型的协方差矩阵对 DEM 误差进行校正,但残留的 DEM 误差仍会影响观测结果,且不同类型的 DEM 数据在高程精度和分辨率上存在差异,会对 InSAR 形变监测结果产生不同的影响[1-3]。

几何畸变能否被正确识别也是 InSAR 形变监测的关键挑战之一。由于 SAR 采用侧视成像方式,当波束斜向照射地表时,在地形起伏较大区域的雷达图像中可能会出现阴影、叠掩和透视收缩等现象。在地形坡度方向与成像方位角相似的区域,应用 InSAR 技术难以准确观测到形变信息,因此进行 SAR 雷达的可视性分析显得尤为重要[4]。目前对 SAR 成像几何带来的阴影、叠掩问题大多需通过外部参考 DEM 和 SAR 卫星几何参数进行计算。研究指出,阴影、叠掩区域的检测能力对相位解缠过程影响显著,进而对形变监测的精度造成重要影响[5-6],但对于不同 DEM 对几何畸变识别的影响仍缺乏相关分析。

针对上述问题,本文采用 5 组不同高程精度、不同空间分辨率的外部 DEM 数据(LiDAR-DEM、ALOS-DEM、ASTER-GDEM、SRTM-1、SRTM-3)作为研究对象,探讨 DEM 的高程精度、时效性和空间分辨率对 SBAS-InSAR 技术形变监测结果的影响,并分析不同 DEM 在几何畸变识别上的差异。

1　研究区与实验数据

1.1　研究区域及 DEM 数据

研究区域位于山东省日照市莒县境内,该地区属低山丘陵区,海拔在 150～430 m。研究区域中部及北部有露天采矿区,矿区西侧还存在一处尾矿库,南部为丘陵区(图 1)。近年来,由于采矿活动,在露天矿区形成了一个巨大的人工矿坑,改变了当地的地形地貌,使早期的 DEM 数据产生较大误差。此外,研究区域存在较多地势平缓的村镇。

本文采用的 DEM 数据见表 1,其中 LiDAR-DEM 是 2018 年通过机载激光雷达获取的[7],相比其他几种 DEM 数据,LiDAR-DEM 具有更高的精度和空间分辨率,且在时效性方面更优秀。

1.2　SAR 数据

本文采用 89 景 C 波段的 Sentinel-1A 升轨数据,重访周期为 12 d,获取日期为 2017-01-03—2019-12-31,距离向分辨率和方位向分辨率分别

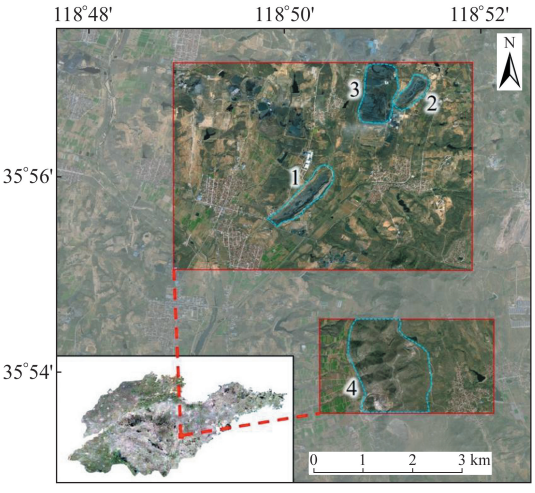
收稿日期:2024-09-30

项目来源:教育部"春晖计划"合作科研项目(HZKY20220484);泰安市科技创新发展项目(2023GX036)。

第一作者简介:张卓普,硕士生,主要研究方向为时序 InSAR 形变监测,E-mail:202283300016@sdust.edu.cn。

通讯作者:张晨晰,博士,副教授,主要研究方向为地表形变监测、卫星导航与精密定位数据处理,E-mail:skd995527@sdust.edu.cn。

为 5 m 和 20 m，成像模式为 IW，极化方式为 VV。轨道数据采用精密定轨星历数据，定位精度优于 5 cm。



区域 1 和区域 2 为露天采矿区，区域 3 为尾矿库，区域 4 为丘陵区

图 1 研究区域

Fig. 1 Study area

表 1 实验 DEM 数据基本参数

Tab. 1 Basic parameters of experimental DEM data

DEM	空间分辨率/m	采集时间	高程精度/m	采集技术
LiDAR-DEM	2	2018 年	0.2	LiDAR
ALOS-DEM	12.5	2006—2011 年	10	InSAR
SRTM-1	30	1999—2000 年	16	InSAR
ASTER-GDEM	30	1999—2008 年	30	立体像对
SRTM-3	90	1999—2000 年	20	InSAR

2 研究方法

2.1 SBAS-InSAR 技术

小基线集干涉测量技术是一种利用雷达卫星数据进行地表形变监测的方法。在 SBAS 技术中，需引入外部 DEM 数据模拟并除去地形相位[8]，地形相位计算公式为：

$$\varphi_{\text{Topo}} = \frac{4\pi B}{\lambda R \sin\theta} h \tag{1}$$

式中，B 为基线垂直于视线向的分量；λ 为雷达波长；R 为雷达与地面目标的距离；θ 为雷达入射角；h 为地表高程。

本文采用控制变量法进行研究，将外部 DEM 数据作为唯一变量进行 SBAS-InSAR 形变监测，分析形变速率、形变量及监测点位数量的差异，分别研究 DEM 的高程精度和分辨率对形变监测结果的影响。处理参数设置为：时间基线阈值为 180 d，空间基线阈值为 300 m，距离向视数为 4，方位向视数为 1，采用同一组地面控制点。相位解缠采用最小费用流法，经轨道误差、大气延迟等校正后，最终得到地表视线向的形变信息。

2.2 SAR 几何畸变

几何畸变是指由于雷达成像的几何特性和地形影响，导致雷达图像中目标点的空间分布与实际地理位置发生偏差或扭曲的现象。几何畸变可能会影响 InSAR 监测的质量和解译，根据入射角和不同地形地貌特征，主要会产生透视收缩、叠掩、阴影 3 种几何畸变。

透视收缩是距离压缩的一种现象（图 2）。当 SAR 卫星观测斜坡 AB 时，SAR 影像上显示的距离 ab 会小于 AB 的实际距离；当观测方向与斜坡 AB 垂直时，ab 在 SAR 影像上可能会重合为一个点。叠掩是一种特殊的距离压缩现象，当山顶的反射信号比山脚的反射信号更早到达接收器时，会在 SAR 影像的距离方向上出现山顶和山脚影像倒置的情况（图 2）。斜坡 DE 在 SAR 影像中对应为 ed，随着斜坡坡度的减缓，叠掩现象会逐渐消失。阴影是另一种几何畸变现象，发生在地形坡度较大时，斜坡背后的区域无法被卫星观测到，从而在影像中形成阴影区，见图 2 中 gj 区域。由此可知，受透视收缩影响的区域得到的 InSAR 监测结果会失真，受阴影及叠掩影响的区域无法在 InSAR 监测中探测到[9]。

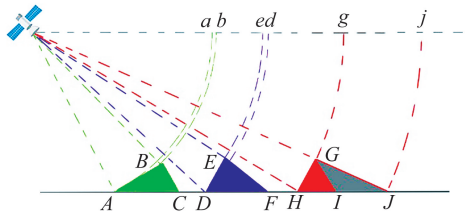


图 2 SAR 影像的几何关系示意图

Fig. 2 Geometric relationship diagram of SAR imaging

有学者在已有地形可视性分析总结的基础上，提出基于 DEM 和 SAR 观测提取几何畸变的 R 指数法[10]。R 指数表示斜距（雷达几何距离）与地面距离之间的比例，其计算需卫星的入射角（θ）、方位角（ω）及利用 DEM 数据模型提取的坡度（α）、坡向（β）等地形因子。首先利用山体阴影模型初步获取阴影参数（SH）和叠掩参数（L），阴影参数（SH）需通过视线方位角（卫星方位角 $\omega+90°$）和卫星入射角余角（$90°-\theta$）获得，叠掩参数（L）需通过卫星视线方位角补角（$\omega+270°$）和卫星入射角（θ）获得；其次通过哨兵一号数据获取卫星飞行参数，并结合坡度、坡向地形因子计算得到 R 指数。

$$R = -\sin(\alpha \cdot \sin(A) - \theta) \tag{2}$$

式中，α 为坡度；A 为地形校正因子，对于本文升轨卫星 $A=\beta+\omega+180°$；θ 为卫星入射角。最后将

所得 R 指数与上述阴影参数(SH)、叠掩参数(L)进行逻辑乘法运算,即可进行雷达可视性分析。当 $0<R\leqslant\sin\theta$($\beta=0$ 时,$R=\sin\theta$)且位于阴影参数(SH)和叠掩参数(L)之外时,为透视收缩;当 $R\geqslant\sin\theta$ 且位于阴影参数(SH)内时,为阴影;当 $-1\leqslant R\leqslant 0$ 且位于叠掩参数(L)内时,为叠掩。

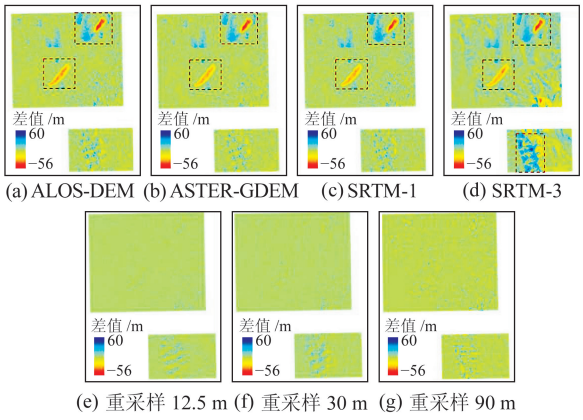
3　实验与分析

3.1　DEM 高程精度分析

通过表 1 可以看出,相较于其他 DEM 数据,LiDAR 扫描获取的 DEM 数据的高程精度和空间分辨率最高,能够更准确地反映地表信息。本文以 LiDAR-DEM 作为参考,对比分析其他不同 DEM 数据的高程精度。首先采用自然邻域法[11]将 LiDAR-DEM 分别重采样至空间分辨率为 12.5 m、30 m 和 90 m(不涉及空间分辨率时统称为 LiDAR-DEM,其余 4 种 DEM 统称为其他 DEM),同时将所有 DEM 转换至 WGS84 坐标系,并统一将高程基准调整为 EGM96,在此基础上对 LiDAR-DEM 与其他 DEM 进行高程精度的对比分析。

图 3 为 LiDAR-DEM 与其他 DEM 的高程差值分布。可以看出,LiDAR-DEM 与其他 DEM 的差异主要集中在露天采矿区,最大高程差值可达 56 m。在丘陵地区,LiDAR-DEM 与 SRTM-3 存在较大差异,最大高程差值达 60 m,与其余 3 种 DEM 数据的差异较小。将 SRTM-3 与其余 3 种 DEM 数据进行对比后发现,丘陵地区均存在较大的高程差值,表明 SRTM-3 在丘陵地区的地表高程精度较低。同时,其余 3 种 DEM 在露天采矿区的高程差异较小,说明这些区域的地形在 DEM 数据采集期间未发生较大变化。LiDAR-DEM 与 3 组重采样 DEM 之间的差异较小,差异主要集中在丘陵地区,且随着分辨率的降低,差异逐渐增大。由于该区域地势起伏复杂,分辨率的降低会导致高程信息的失真,尽管如此,3 组重采样 DEM 仍在很大程度上保留了 LiDAR-DEM 的地表信息。

地形地貌是评估 DEM 垂直误差的关键因素[12],选取村镇、丘陵区和露天采矿场 3 种具有不同地形特征的区域为样本进行统计分析,计算平均误差(用于评估各地 DEM 数据的系统误差)、绝对误差均值(防止平均误差计算时正负误差相抵消)及均方根误差(用于反映误差的总体大小)[13],结果见表 2~4(单位 mm)。可以看出,由于地形变化较大,4 种 DEM 在露天采矿区的高程



(a) ALOS-DEM (b) ASTER-GDEM (c) SRTM-1 (d) SRTM-3

(e) 重采样 12.5 m (f) 重采样 30 m (g) 重采样 90 m

图 3　DEM 差值

Fig. 3　DEM differences

误差较大,不能反映真实地表高程信息。通过对村镇和丘陵区 DEM 误差数据进行分析,其他 DEM 的高程精度依次为 ALOS-DEM、SRTM-1、ASTER-GDEM、SRTM-3。

表 2　村镇区 DEM 高程精度对比

Tab. 2　Comparison of DEM elevation accuracy in village area

DEM	平均误差	绝对误差均值	均方根误差
ALOS-DEM	−0.10	1.24	1.58
ASTER-GDEM	0.71	1.46	1.96
SRTM-1	0.15	1.42	1.62
SRTM-3	1.03	1.93	2.79

表 3　丘陵区 DEM 高程精度对比

Tab. 3　Comparison of DEM elevation accuracy in hilly area

DEM	平均误差	绝对误差均值	均方根误差
ALOS-DEM	1.12	4.82	6.37
ASTER-GDEM	2.18	4.98	6.94
SRTM-1	0.63	4.94	6.39
SRTM-3	8.43	14.31	18.63

表 4　露天采矿区 DEM 高程精度对比

Tab. 4　Comparison of DEM elevation accuracy in open-pit mining areas

DEM	平均误差	绝对误差均值	均方根误差
ALOS-DEM	−16.21	16.82	20.49
ASTER-GDEM	−15.08	15.92	19.27
SRTM-1	−14.72	15.82	19.43
SRTM-3	−15.01	15.57	19.13

3.2　不同 DEM 数据的形变监测结果分析

通过 SBAS-InSAR 技术,分别利用 5 组外部 DEM 数据与 3 组重采样 DEM 数据对研究区域进行观测,并对得到的 8 组形变监测结果进行线性回归方程分析,8 组监测结果都具有较高的可靠性。图 4 为 8 组 DEM 数据的形变速率监测结果,均显示在露天采矿区和丘陵区发生明显形变。以露天采矿区(区域 1)和丘陵区(区域 4)为例进行形变速率(图 5)分析,可以看出,露天采矿区存在地面抬升现象,而丘陵区则表现为沉降。在丘

陵区，基于 LiDAR-DEM 数据与重采样 DEM 数据的监测信息出现明显的缺失现象。

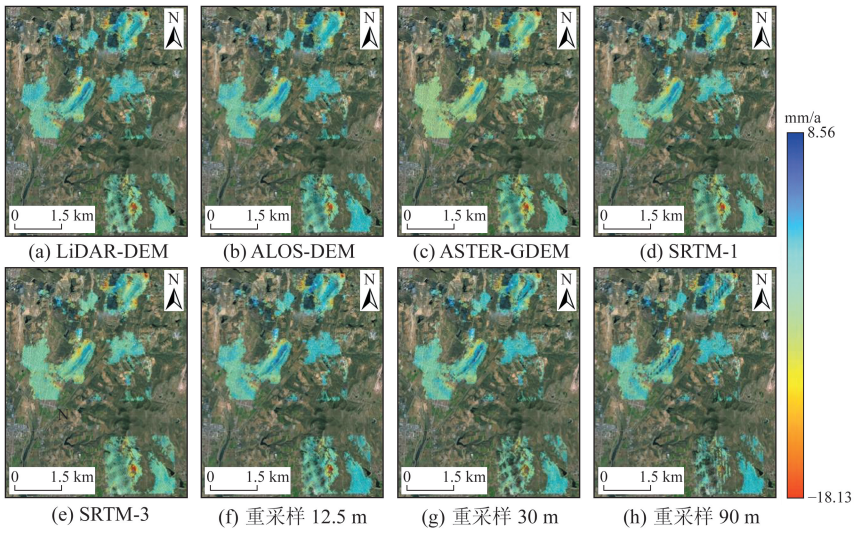


图 4 8 组 DEM 数据的形变速率

Fig. 4 Deformation rate of DEM data of 8 groups

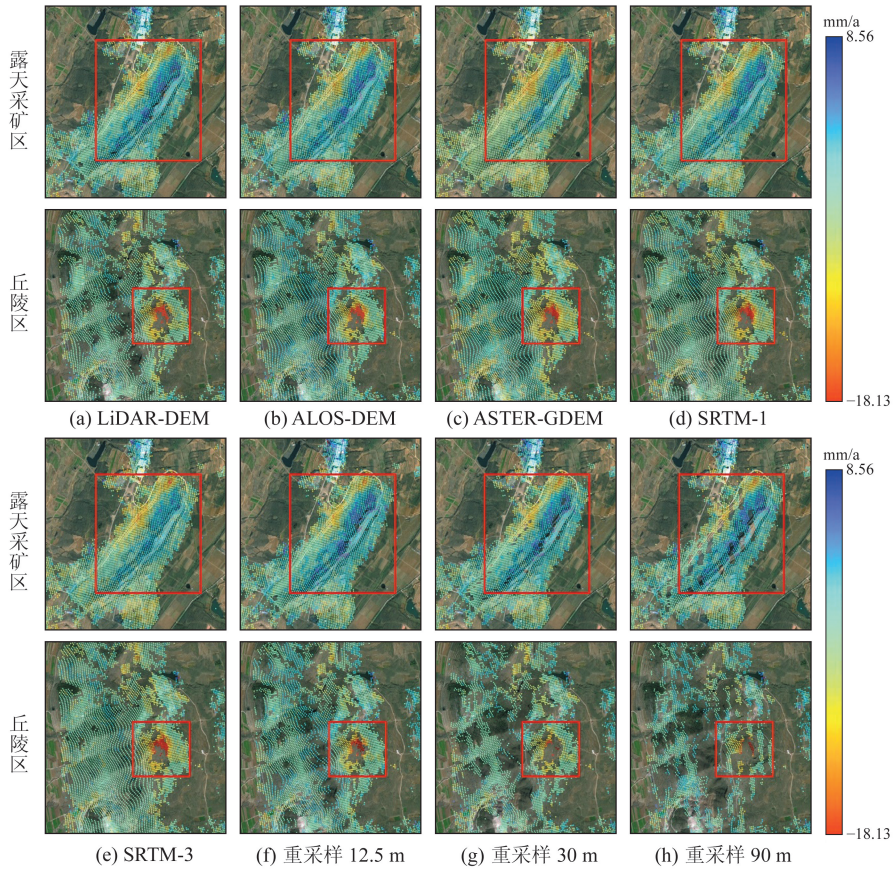


图 5 露天采矿区与丘陵区形变速率

Fig. 5 Deformation rate of open-pit mining area and hilly area

将 8 组 DEM 数据实验中所有监测点位进行统计分析，结果见表 5。可以看出，基于 ASTER-GDEM 与 SRTM-3 得到的平均形变速率与其他数据存在较大差异。在监测点数量分析中发现，基于 LiDAR-DEM 和重采样 DEM 得到的监测点数据较少，且随着分辨率的降低，监测点数量也呈下降趋势，而其他 4 组外部 DEM 得到的监测点数据比较接近。通过对比 8 组实验数据相干系数发现，外部 DEM 的差异对相干性的影响较小，特别是在强相干区域，因此相干性不是造成基于重采样 DEM 得到的监测点数据较少的主要原因。

为深入研究不同地形形变量的稳定性，在形变趋势较显著的丘陵区和露天采矿区（图 5 红框）内选取全部同名点位，并在形变较为平稳的村镇

区选取监测点进行形变稳定性对比分析,不同 DEM 在 3 处地形的形变量均方差见表 6(单位 mm)。在地形平缓的村镇区域,8 组实验的形变量均方差值相近;在丘陵区,基于 SRTM-3 的形变量均方差值最大,且显著高于其他数据集,在露天采矿区观察到了类似趋势,即 SRTM-3 最大,ASTER-GDEM 次之。在高程精度相似的情况下,对比分析基于 LiDAR-DEM 与 3 组重采样 DEM 数据的监测结果发现,3 组基于重采样 DEM 数据得到的形变量均方差值与基于 LiDAR-DEM 数据的均方差值相近,表明 DEM 的空间分辨率对时序处理结果影响较小。将 3 组重采样 DEM 数据的监测结果分别与空间分辨率相同的全球 DEM 监测结果进行对比发现,除重采样分辨率为 12.5 m 的数据结果比 ALOS-DEM 在露天采矿区的形变量均方差值大外,同分辨率下高程精度较高的重采样数据表现更好,其中重采样分辨率为 90 m 的数据结果与 SRTM-3 的最为明显,且重采样分辨率为 12.5 m 的数据结果与 ALOS-DEM 的形变量均方差值差异较小,存在一定的偶然误差。值得注意的是,5 组外部 DEM 数据之间的形变量均方差值排序与 DEM 的高程精度相关,表明相较于 DEM 的空间分辨率,高程精度是影响监测精度的关键因素。

表 5　研究区内形变信息

Tab. 5　Deformation information in study area

DEM	平均形变速率 /mm·a^{-1}	均方差 /mm·a^{-1}	监测点位数量
LiDAR-DEM	−0.227	2.126	30 975
ALOS-DEM	−0.004	2.136	31 819
ASTER-GDEM	−0.861	2.160	31 852
SRTM-1	−0.345	2.130	31 778
SRTM-3	−0.948	2.181	31 325
重采样 12.5 m	−0.120	2.122	29 661
重采样 30 m	−0.074	2.121	28 880
重采样 90 m	−0.210	2.119	26 881

表 6　不同区域形变量均方差

Tab. 6　Mean square error of deformation in different areas

DEM	村镇形变量均方差	丘陵形变量均方差	露天采矿区形变量均方差
LiDAR-DEM	3.28	7.41	9.01
ALOS-DEM	3.70	8.12	9.01
ASTER-GDEM	3.62	8.62	9.88
SRTM-1	2.90	7.92	9.23
SRTM-3	2.69	11.71	13.70
重采样 12.5 m	2.78	7.52	9.15
重采样 30 m	3.66	7.56	9.18
重采样 90 m	3.32	7.91	9.28

3.3　斜视成像几何畸变分析

为分析不同外部 DEM 数据引起的几何畸变差异,根据 SAR 卫星的轨道信息、入射角等参数,采用 R 指数法对 8 组 DEM 数据产生的几何畸变进行分析,结果见图 6 和 7。从图 6 可以看出,与其他 DEM 数据相比,基于 LiDAR-DEM 及重采样 DEM 数据在丘陵区识别出更多的阴影和叠掩区域。从图 7 可以看出,采用 LiDAR-DEM 和重采样 DEM 数据识别到的阴影和叠掩面积明显大于其他 DEM 数据,且随着重采样 DEM 分辨率的降低而增加。

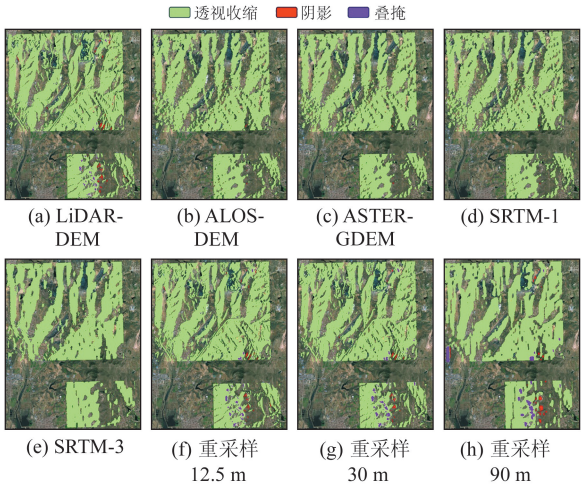


图 6　几何畸变分析

Fig. 6　Geometric distortion analysis

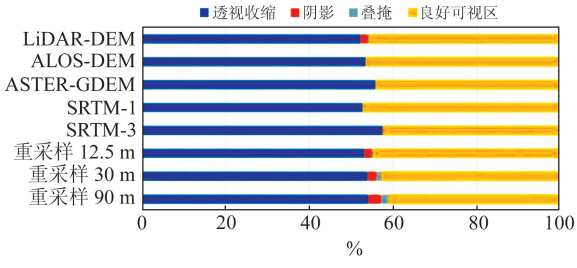


图 7　几何畸变信息占比

Fig. 7　Proportion of geometric distortion information

坡度是造成几何畸变现象的重要因素,随着坡度的增大,可视性逐渐降低[14]。8 组 DEM 数据的坡度计算结果见图 8,可以看出,在丘陵区,LiDAR-DEM 及其重采样数据表现出更明显的大坡度特征,而其他数据在该区域的表现较为平缓。3 组重采样 DEM 数据随分辨率的降低,坡度细节信息逐渐损失,坡度起伏减小。以 LiDAR-DEM 识别的阴影和叠掩为例,阴影及叠掩的分布与大坡度区域基本重合。由图 9 可知,8 组 DEM 数据识别到的阴影和叠掩面积与 DEM 的 35°以上大坡度占比呈正相关。

其他 4 种全球 DEM 数据在制作过程中会对原始数据进行噪声去除(如 SRTM-1 采用多重回波用于减少地表植被、建筑物带来的高程误差)和

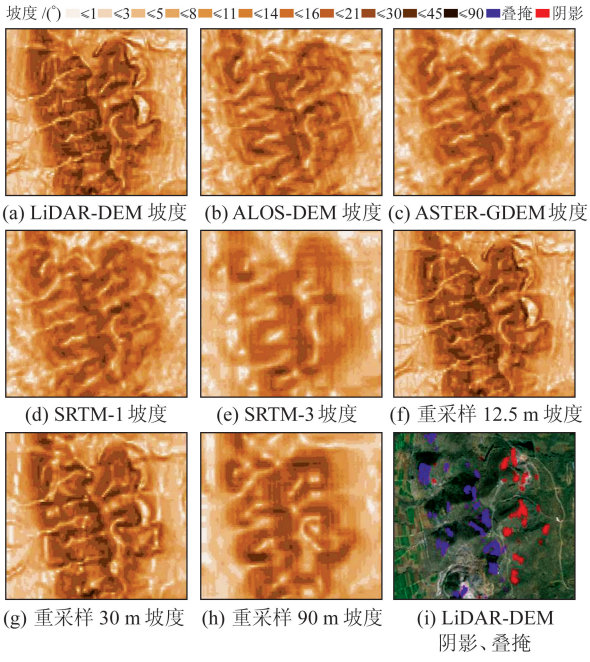


图 8 DEM 坡度图

Fig. 8 DEM slope map

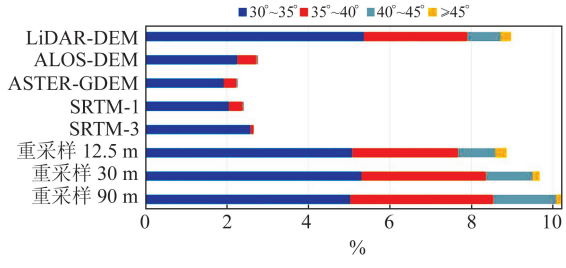


图 9 丘陵区坡度占比

Fig. 9 Slope proportion in hilly area

平滑处理(如高斯滤波器、插值使 DEM 表面更加连续平滑)[15],造成局部地形失真,不能表现真实地形。在相同分辨率下,重采样 DEM 数据能够识别到更多的阴影和叠掩,对比 LiDAR-DEM 与 3 组重采样 DEM 数据识别到的阴影和叠掩发现,随着分辨率的降低,识别到的阴影和叠掩面积在增大,而增加的区域有很大一部分在 LiDAR-DEM 中是低缓坡度,不能准确反映真实地表,所以存在过度识别,甚至错误识别现象。说明随着 DEM 空间分辨率的降低,观测精准度也随之降低。阴影和叠掩被 LiDAR-DEM 和 3 组重采样 DEM 数据大面积识别,可能是导致表 5 中对应监测点数据较少的原因,而其他 DEM 数据没有识别到较多区域的阴影和叠掩,这些没有被识别到的区域在解缠过程中可能会引入更多误差,导致观测精度的下降。

4 结 语

本文以地形变化较大的露天采矿区和丘陵区为研究区域,通过 5 组外部 DEM 与 3 组重采样 DEM 数据(高程精度与 LiDAR-DEM 相近),分别探讨 DEM 的高程精度和空间分辨率对形变监测精度和几何畸变识别的影响。

在地表发生明显变化的区域,全球 DEM 数据不能准确反映当前高程信息。在形变监测方面,通过对比 8 组形变监测实验发现,3 组重采样 DEM 与 LiDAR-DEM 监测结果相近,且均比同分辨率下全球 DEM 数据的形变监测结果表现优秀。进一步分析表明,在形变监测中,相较于 DEM 的空间分辨率,高程精度是影响监测精度的关键因素,而在地形平缓的区域,不同 DEM 的形变监测结果差异较小。

在几何畸变识别方面,由于在制作过程中采用降噪和平滑处理,全球 DEM 数据虽然提高了数据的整体稳定性,但同时也失去了局部地形细节,从而影响几何畸变的准确识别,因此 DEM 的高程精度是影响几何畸变识别的重要因素。通过对比 LiDAR-DEM 与 3 组重采样 DEM 的识别结果发现,随着分辨率的降低,识别到的几何畸变面积增大,但低分辨率 DEM 不能反映真实的地表坡度及坡向,从而造成过度识别,甚至错误识别,因此 DEM 的空间分辨率也是影响几何畸变识别的重要因素。全球 DEM 数据在地势起伏较大区域存在细节丢失,在几何畸变识别方面应用困难,需要高精度、高分辨率 DEM 数据进行辅助。

本文研究表明,针对 SBAS-InSAR 监测,尤其在地形复杂区域,选择高精度、高分辨率的 DEM 数据,能显著提高形变监测的准确性和几何畸变识别的精度。

参考文献

[1] Zhou H F, Zhang J F, Gong L X, et al. Comparison and Validation of Different DEM Data Derived from InSAR[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 12: 590-597

[2] 李映辰, 柯樱海, 宫辉力, 等. DEM 对 PS-InSAR 地面沉降监测的影响[J]. 测绘科学, 2018, 43(1): 124-134(Li Yingchen, Ke Yinghai, Gong Huili, et al. Influence of DEM on Ground Subsidence Monitoring of PS-InSAR[J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(1): 124-134)

[3] 王志红, 任金铜, 游洪, 等. InSAR 结合概率积分法的矿区外围形变监测[J]. 测绘科学, 2022, 47(1): 84-94(Wang Zhihong, Ren Jintong, You Hong, et al. Application of InSAR Technology Combined with Probability Integral Method in Deformation Monitoring of Mining Area Periphery[J]. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(1): 84-94)

[4] Novellino A, Cigna F, Brahmi M, et al. Assessing the Feasibility of a National InSAR Ground Deformation Map of Great

Britain with Sentinel-1[J]. Geosciences, 2017, 7(2): 19

[5] 戴可人, 铁永波, 许强, 等. 高山峡谷区滑坡灾害隐患 InSAR 早期识别: 以雅砻江中段为例[J]. 雷达学报, 2020, 9(3): 554-568(Dai Keren, Tie Yongbo, Xu Qiang, et al. Early Identification of Potential Landslide Geohazards in Alpine-Canyon Terrain Based on SAR Interferometry—A Case Study of the Middle Section of Yalong River[J]. Journal of Radars, 2020, 9(3): 554-568)

[6] Ren T H, Gong W P, Bowa V M, et al. An Improved *R*-Index Model for Terrain Visibility Analysis for Landslide Monitoring with InSAR[J]. Remote Sensing, 2021, 13(10): 1938

[7] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 36100—2018 机载激光雷达点云数据质量评价指标及计算方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 36100—2018 Indices and Computation Method of Quality Assessment for Airborne LiDAR Point Cloud Data [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018)

[8] Wang H, Wright T J, Yu Y P, et al. InSAR Reveals Coastal Subsidence in the Pearl River Delta, China[J]. Geophysical Journal International, 2012, 191(3): 1119-1128

[9] Colesanti C, Wasowski J. Investigating Landslides with Space-Borne Synthetic Aperture Radar(SAR) Interferometry[J]. Engineering Geology, 2006, 88(3-4): 173-199

[10] Notti D, Herrera G, Bianchini S, et al. A Methodology for Improving Landslide PSI Data Analysis[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(6): 2186-2214

[11] 谭衢霖, 徐潇, 王浩宇, 等. 不同地貌类型区 DEM 空间内插算法精度评价[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(1): 139-149(Tan Qulin, Xu Xiao, Wang Haoyu, et al. Accuracy Assessment of DEM Interpolation Algorithms in Different Landform Regions[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(1): 139-149)

[12] 武文娇, 章诗芳, 赵尚民. 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 Wenjiao, Zhang Shifang, Zhao Shangmin. Analysis and Comparison of SRTM1 DEM and ASTER GDEM V2 Data[J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19(8): 1108-1115)

[13] 张欢, 李弘毅, 李浩杰, 等. 基于机载 LiDAR 的高寒山区遥感高程数据精度评估[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(6): 1311-1320(Zhang Huan, Li Hongyi, Li Haojie, et al. Accuracy Evaluation of Remote Sensing Elevation Data in Alpine Mountains Based on Airborne LiDAR[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(6): 1311-1320)

[14] Chen X H, Sun Q, Hu J. Generation of Complete SAR Geometric Distortion Maps Based on DEM and Neighbor Gradient Algorithm[J]. Applied Sciences, 2018, 8(11): 2206

[15] Yue L W, Shen H F, Zhang L P, 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

Impact Analysis of DEM on SBAS-InSAR Deformation Monitoring and Geometric Distortion Identification

ZHANG Zhuopu[1]　*ZHANG Chenxi*[1]　*YU Zhigang*[1]
ZHANG Guanghui[1]　*YANG Xu*[1]　*LIU Chunyu*[1]

1　College of Resources, Shandong University of Science and Technology, 223 Daizong Street, Taian 271000, China

Abstract: Taking the hilly open-pit mining area in central Shandong as the study region, this research analyzes the impacts of different DEMs(SRTM-1, SRTM-3, ALOS-DEM, ASTER-GDEM, and LiDAR-DEM) and their elevation accuracy/spatial resolution on SBAS-InSAR deformation monitoring performance and geometric distortion identification. Results demonstrate that compared to spatial resolution, DEM elevation accuracy plays a more critical role in deformation monitoring and significantly affects measurement precision. Both DEM elevation accuracy and spatial resolution substantially influence the identification of shadow and layover areas. These findings provide guidance for DEM data selection in subsequent time-series deformation monitoring in complex terrains.

Key words: SBAS-InSAR; DEM; open-pit mine; deometric distortion; deformation accuracy

Foundation support: Chunhui Project Foundation of the Education Department of China, No. HZKY20220484; Taian Science and Technology Innovation Development Program, No. 2023GX036.

About the first author: ZHANG Zhuopu, postgraduate, majors in time-series InSAR deformation monitoring, E-mail: 202283300016@sdust.edu.cn.

Corresponding author: ZHANG Chenxi, PhD, associate professor, majors in surface deformation monitoring, satellite navigation and precision positioning data processing, E-mail: skd995527@sdust.edu.cn.