引文格式：刘东烈,陆超然,郭金城,等. 时序InSAR滑坡探测与DEM误差影响分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(11): 39-45. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.11.010

时序InSAR滑坡探测与DEM误差影响分析

刘东烈[1]，陆超然[2,3*]，郭金城[4]，蔡杰华[3]，董　杰[4]，张　路[3]，廖明生[3]
（1. 贵州省自然资源卫星应用中心，贵州 贵阳 550001；2. 航天宏图信息技术股份有限公司，北京 100195；
3. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室，湖北 武汉 430079；4. 武汉大学 遥感信息工程学院，湖北 武汉 430079）

摘　要：以贵州省西南山区为例，针对地质灾害隐患早期识别的实际情况和需求，开展差分干涉测量和时序InSAR方法的对比实验，以验证时序InSAR在抗误差干扰、探测微小形变、捕捉形变序列演化趋势等方面的能力；再基于高精度LiDAR DEM数据进一步研究DEM误差对时序InSAR处理结果的影响。实验表明，时序InSAR方法无法完全剔除DEM误差，从而导致形变速率、形变序列估计不准，在开展精细化InSAR形变分析时应尽可能选取高精度的外部DEM数据，以保证正确估计地质灾害隐患形变特征。

关键词：差分干涉测量；时序InSAR；地质灾害；隐患探测；DEM误差
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）11-0039-07

Landslide Detection and Influence Analysis of DEM Errors Using Time Series InSAR

LIU Donglie[1], LU Chaoran[2,3], GUO Jincheng[4], CAI Jiehua[3], DONG Jie[4], ZHANG Lu[3], LIAO Mingsheng[3]
(1. Natural Resources Satellite Remote Sensing Application Center, Guiyang 550001, China;
2. Piesat Information Technology Co., Ltd., Beijing 100195, China;
3. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
4. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In this study, taking the mountainous area in southwest of Guizhou for example, we compared the results of differential InSAR and time series InSAR(TSI), and verified the capability of TSI in resisting error interference, detecting weak deformation and capturing the evolution of deformation for the huge demand of geological hazards early identification. And then, we further studied the influence of DEM errors on TSI processing based on high-precision LiDAR DEM data. Experimental result shows that TSI method cannot completely eliminate DEM errors, resulting in the inaccurate estimation of deformation rate and deformation sequence. When carrying out refined InSAR deformation analysis, the high-precision DEM data should be selected to ensure the correct estimation of deformation characteristics of geological hazards.

Key words: differential InSAR, TSI, geological hazard, potential hazard detection, DEM error

贵州省位于我国西南地区，地形地貌复杂、雨源性水系发育，加之水利工程、城市建设、矿山开采等促进经济发展的工程项目日趋增多，在自然和人为因素的双重影响下，地质灾害频繁发生[1]，给人民生命财产安全和社会经济发展带来了不可逆转的伤害，开展大范围地质灾害隐患排查刻不容缓。合成孔径雷达干涉（InSAR）采用主动式微波成像技术，空天作业方式实现了全天时、全天候、高精度、大范围对地观测[2]，可满足贵州省“天无三日晴、地无三尺平”的复杂观测条件。差分干涉测量技术（D-InSAR）是目前InSAR提取地表形变中的常用技术，已成功应用于地震[3]、矿区沉降[4]、滑坡[5]等地质灾害监测中；但随着时间和空间基线的拉长，差分干涉对的相干性降低[6]，且两期影像成像时大气条件的差异也会对形变结果造成极大干扰[7]，影响解缠和解译过程，从而限制了其应用范围[8]。随着SAR传感器的不断进步和SAR数据的积累，可靠性更高的时序InSAR（TSI）技术应运而生，如永久散射体干涉测量[9]、小基线集[10]（SBAS）、干涉点目标分析[11]和StaMPS方法[12-14]等。这些时间序列方法通过对一系列差分干涉相位进行联合

收稿日期：2022-05-10。
项目来源：国家自然科学基金青年基金资助项目（41904001）；四川省科技计划资助项目（2021JDR0394）。
第一作者简介：刘东烈（1987—），正高职高级工程师，博士生导师，副主任，研究方向为卫星定位与遥感技术及其在地质灾害防治中的应用，E-mail：donglie.liu@westernbeidou.com。
通信作者：陆超然（1997—），硕士，研究方向为雷达干涉测量在地灾监测中的应用、深度学习对地观测，E-mail：chaoranlu@whu.edu.cn。

分析，有效抑制了失相干、DEM误差和大气相位延迟等的影响[15]。近年来，众多学者采用InSAR技术开展了地质灾害隐患早期识别研究，如Shi X G[16]等集成3个相邻轨道的ALOS/PALSAR数据获取了三峡地区秭归—奉节段的斜坡形变，并探测到30处活动性滑坡；Zhao C Y[17]等采用TSI技术在金沙江乌东德水电站附近区域发现了22处滑坡，并探究了金坪子滑坡的时空形变特征；廖明生[18]等针对滑坡形变监测中的关键问题，先后提出了相干散射体TSI方法[19]、基于点目标的像素偏移量追踪方法[20]、垂直分层大气延迟改正模型[21]等，为滑坡形变监测应用中常见的重难点问题提供了有效的解决方案。在山区开展InSAR处理分析时，需引入外部DEM去除地形相位。常用的开放DEM数据的空间分辨率和高程测量精度有限，且或多或少已“过时”，与真实地表形态存在差异。已有学者对比了不同DEM数据对TSI结果的影响[22-23]，但未使用高分辨率高精度DEM（LiDAR DEM）进行分析。

本文针对山区地质灾害隐患早期识别的需求与现状，首先在贵州省西南山区的兴仁县开展D-InSAR与TSI的对比分析，以验证TSI方法在山区地质灾害隐患探测中的优势和必要性；然后基于贵州省水城县重点区域AW3D30、SRTM-3和LiDAR DEM，系统研究了外部DEM对山区TSI数据处理结果的影响，为山区SAR数据处理提供参考。

1 研究方法

D-InSAR对两景雷达影像进行相位差分，处理简单，能快速获取观测时段内的地表形变信息，但失相干、大气相位延迟、DEM误差等因素干扰了形变信号的提取。StaMPS-SBAS方法在多对差分干涉结果的基础上进一步开展相位分析（图1），假设形变相位空间相关，首先采用低通自适应滤波器迭代计算相位的稳定性，并以此为测度选取相干点目标；再估计并剔除DEM误差；然后在平面、空间和时间3个维度上开展相位解缠，并将小基线集的多主影像相位转到单主影像相位；最后进行时空滤波，去除大气延迟相位，获取形变速率和形变序列。该方法能削弱大气延迟、DEM误差、去相干噪声等干扰相位的影响，可获取精准、可靠的时序形变结果。

在上述过程中，需引入外部DEM模拟和去除地形相位，通常是将DEM与主影像配准，结合成像几何，根据式（1）计算地形相位：

$$\phi_{\text{topo}} = \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda \times R \times \sin\theta} h \tag{1}$$

式中，h为地面高；λ为雷达波长；$B_{\perp}$为基线垂直于视线向（LOS）的分量；R为雷达天线到地面目标的距离；θ为雷达入射角。

由此可知，DEM直接影响了干涉相位，DEM误差越大，干涉相位中的残余地形误差相位越大；而TSI分析则是在大量差分干涉结果的基础上进行时空域滤波、迭代相位分析等工作，DEM误差对其影响无法直观、定量地表示出来，仍需探究。

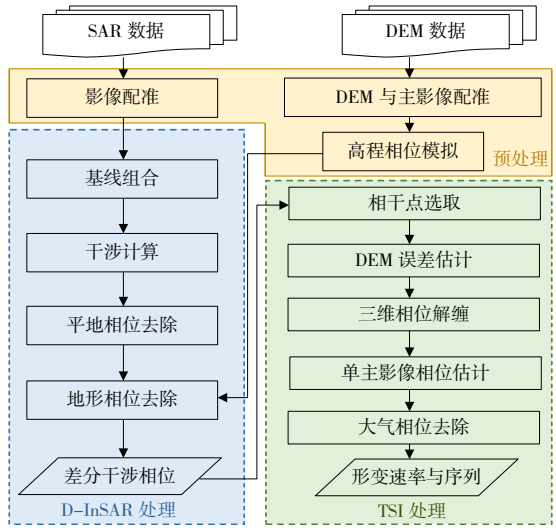


图1 StaMPS-SBAS方法流程图

2 研究区域与数据来源

2.1 研究区概况

研究区位于贵州省西南山区，分别隶属于黔西南布依族苗族自治州兴仁县和六盘水市水城县。兴仁县是地质灾害多发县，地形起伏剧烈，地层和地质构造复杂，地貌多样且侵蚀剥蚀地貌十分发育；雨量充沛，年均降水量为1 286 mm，最大降水量达1 618 mm；金矿和煤矿资源富集，矿区开采活动强烈；地质灾害主要包括滑坡、崩塌、泥石流、地裂缝、地面塌陷、地面沉降等类型，其中滑坡灾害占大部分，空间上呈局部密集式分布特征，主要表现为人类工程活动强烈的地区成群出现，其中矿山开采导致的地质灾害占比最高。水城县地形复杂，部分山区呈现出断崖式的剧烈起伏，坡度甚至达到45°~60°，山体岩溶地貌发育，地表稳定性差；雨量充沛，年均降水量为1 100 mm，降雨集中在5—9月；煤炭资源丰富，存在不同程度的开采活动。2019年7月23日鸡场镇坪地村岔沟组发生了特大型山体滑坡，造成了重大人员伤亡，该地区是贵州省地质灾害防治的重点

区域。

2.2　SAR数据

本文采用4景L波段的ALOS-2/PALSAR2超精细模式（Ultrafine）数据[24]和117景升轨Sentinel-1宽幅干涉模式数据[25]（表1）。Sentinel-1数据面向全球开放，重访周期为12 d，轨道稳定，充足、连续、稳定的观测数据保证了一定时间内的相位相干性。Sentinel-1数据的时空基线见图2，共构成345对小基线对。

表1　星载SAR数据参数

参数类型	ALOS-2/PALSAR2	Sentinel-1
波长	23.6 cm	5.55 cm
入射角	约36°	约42°
空间分辨率	2.4 m×2.1 m	20 m×5 m
获取日期	2018-02-18、2018-05-13、2019-01-20、2019-03-03	2017-01-07—2020-11-11

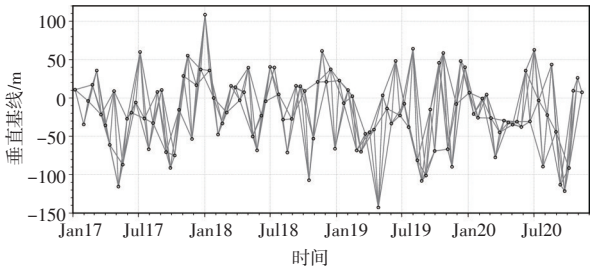


图2　Sentinel-1数据集的时空基线组合

2.3　DEM数据

本文分别利用SRTM-3、AW3D30和LiDAR DEM数据模拟InSAR地形相位，相关参数对比见表2，高程基准均为EGM96水准面，无需进行基准校正。由于LiDAR DEM数据的精度远高于AW3D30和SRTM-3，结果分析中将LiDAR DEM作为真值，水城县的LiDAR DEM、AW3D30和SRTM-3见图3，随着DEM分辨率的提高，地形反映得更加真实细致，可辅助隐蔽性地质灾害的识别[26]。

表2　LiDAR DEM、AW3D30和SRTM-3参数对比

数据类型	获取时间	空间分辨率	垂直精度
LiDAR DEM	2020年12月	2 m	厘米级
AW3D30[27]	2006—2011年	1弧秒（约30 m）	均方根误差5 m
SRTM-3[28]	2000年2月	3弧秒（约90 m）	绝对垂直误差±16 m（LE90）

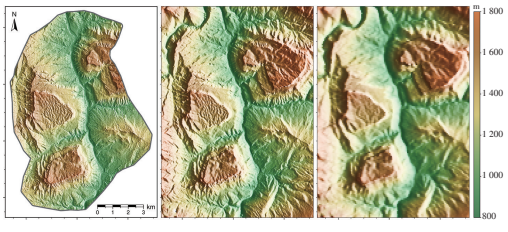
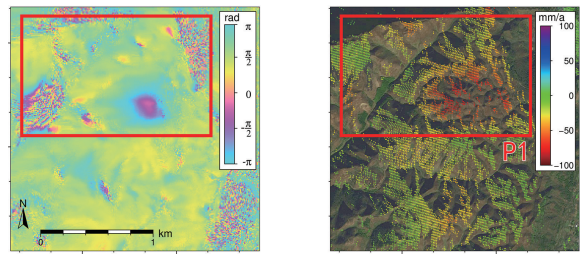


图3　水城县的LiDAR DEM、AW3D30和SRTM-3

3　D-InSAR与TSI滑坡探测的对比

本文在兴仁县境内选取4个具有代表性的区域，对D-InSAR和StaMPS-SBAS时序分析的滑坡探测与监测结果进行对比分析，以证明TSI在山区形变范围圈定、大气延迟削弱、微小形变探测和长时间序列特征分析方面的优势。

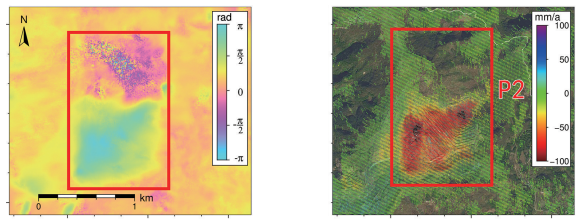
1）TSI圈定形变范围分析。P1区域位于兴仁县潘家庄镇褚皮田村。由图4可知，D-InSAR探测的形变范围与TSI基本一致，但D-InSAR获取形变范围明显更小，只能获取两次成像期间的累积形变，而TSI能准确、全面地给出长时序形变的空间范围。



a 2018-02-18—2018-05-13差分干涉图　　b LOS向形变速率

图4　P1区域D-InSAR与TSI结果

2）TSI抗误差干扰分析。P2区域位于兴仁县潘家庄镇扯尼姑村。图5a中红色框南北区域分别出现了沉降和抬升的形变信号，而图5b仅探测到南部的沉降信号，北部未见明显抬升。对比多对干涉图发现，该信号仅出现在与2019-01-20影像干涉的相位图中；且根据距P2区域18 km的兴仁县气象站历史数据显示，2019-01-20前后出现间歇性雨雪天气，因此推断北部出现的异常相位是由气象条件差异引起的，而TSI能削弱该影响。

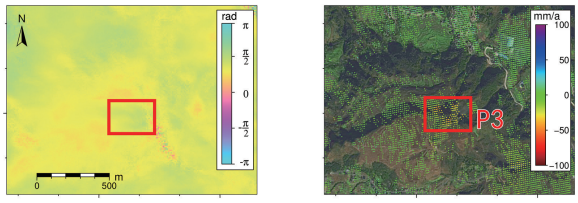


a 2019-01-20—2019-03-03差分干涉图　　b LOS向形变速率

图5　P2区域D-InSAR与TSI结果

3）TSI探测微小形变分析。P3区域位于P1和P2之间，由图6b可知，该区域发生了形变速率为-17 mm/a的微小形变，D-InSAR方法难以有效探测出这样的微小形变；而TSI则能满足微小形变的探测与分析。

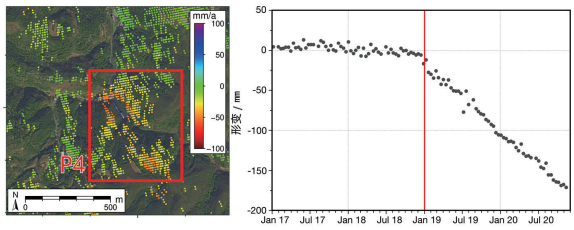
4）TSI长时间形变特征分析。P4区域位于兴仁县城南街道保驹村，由图7b可知，该区域在2019年1月



a 2018-02-18—2018-05-13差分干涉图　　b LOS向形变速率

图6 P3区域D-InSAR与TSI结果

前基本未发生形变，此后开始滑动，LOS向形变速率达到了-83 mm/a，TSI能反映隐患点的形变序列特征，为灾害的稳定性预警提供重要的指示依据。



a LOS向形变速率图　　b 形变序列图

图7 P4区域D-InSAR与TSI结果

4 DEM对TSI分析的影响

本文以LiDAR DEM为地表高程真值，对比分析了3种DEM的高程及其对相干点选取、DEM误差估计、形变速率、形变序列的影响。

4.1 多源DEM数据高程对比

AW3D30和SRTM-3的高程误差分布和统计直方图见图8，红色、蓝色分别表示LiDAR DEM高于、低于其他两种DEM，可以看出，SRTM-3的高程误差明显大于AW3D30，误差标准差达到24.71 m；在坡度较陡的区域地形误差均较大（蓝框区域），符合AW3D30、SRTM-3在坡度大区域高程精度较低的结论[27,29]；部分区域展现出了无明显分布规律的小范围误差（红框区域），可能为地表形态发生了较大变化。

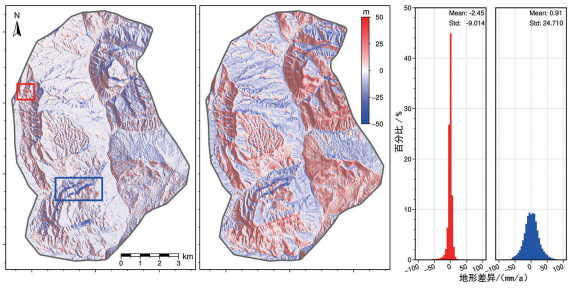
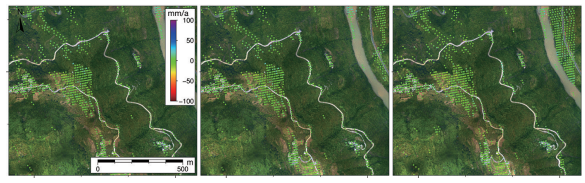


图8 AW3D30和SRTM-3高程误差分布和统计直方图

4.2 DEM对相干点选取的影响

由于StaMPS通过分析相位稳定性来选取相干点，外部DEM可通过影响地形残余相位的方式间接影响相干点选取的数量和质量。在相同的参数条件下，LiDAR DEM、AW3D30和SRTM-3选取的相干点数量分别为268 425个、268 998个、274 419个，平均相干性均为0.31，总体差异不大。3种DEM选取的相干点分布的局部细节见图9，可以看出，LiDAR DEM与AW3D30基本一致，而与SRTM-3差异明显；道路上分布有相干点，LiDAR DEM、AW3D30选取的相干点与道路重叠度较高，而SRTM-3在地形变化区域选取的相干点与道路明显偏移，地理编码精度较低。总体而言，不同DEM对选点的数量和相干性水平没有显著影响，但在局部区域，低精度DEM获取的相干点可能存在地理编码不准确的问题。

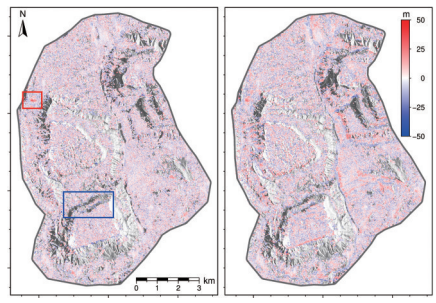


a LiDAR　　b AW3D30　　c SRTM-3

图9 采用3种DEM时的相干点局部分布

4.3 DEM误差估计

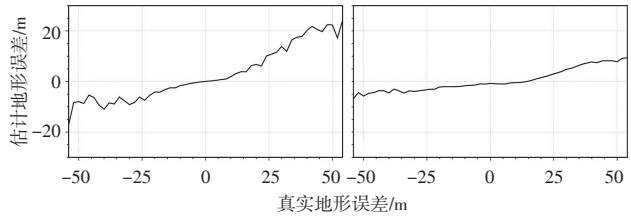
采用StaMPS-SBAS估计的DEM误差见图10，对比图8可知，估计的DEM地形误差与实际地形差异的局部特征基本一致，如图8中的地形差异较大区域（蓝框）和地形变化区域（红框）在图10中也有相应特征；但StaMPS-SBAS估计的DEM误差明显低于实际地形误差，尤其是低精度的SRTM-3。



a AW3D30　　b SRTM-3

图10 采用AW3D30和SRTM-3的地形误差估计结果

StaMPS-SBAS估计的地形误差与真实地形误差的关系见图11，可以看出，StaMPS-SBAS估计的DEM误差与真实误差基本呈正相关关系，但明显低于真实



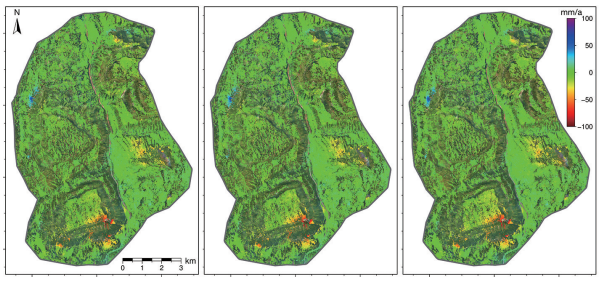
a AW3D30　　b SRTM-3

图11 AW3D30和SRTM-3估计的地形误差与真值的关系

地形误差，DEM真实误差为50 m时，AW3D30估值约为22 m，SRTM-3估值仅为8 m，说明StaMPS-SBAS方法能去除一定的DEM误差，但会低估其真实值，该问题在低精度DEM中表现得更严重。

4.4　DEM对形变速率的影响

采用LiDAR DEM、AW3D30、SRTM-3进行TSI分析获取的LOS向形变速率图见图12。以LiDAR DEM获取的平均形变速率为准，以10 m为半径寻找3组结果的同名点并作差，得到形变速率差异图（图13）：AW3D30与LiDAR DEM获取的形变速率差异较小，平均绝对误差约为3.55 mm/a；SRTM-3获取的形变速率差异集中在±20 mm/a；对比图8发现，形变速率差异与DEM误差的空间分布不相关，说明StaMPS-SBAS方法能在一定程度上反演出DEM误差的整体趋势与局部特征，但低估了DEM误差的真实值，从而引起形变速率的估计偏差。



a LiDAR DEM　　b AW3D30　　c SRTM-3

图12　采用3种DEM的LOS向形变速率图

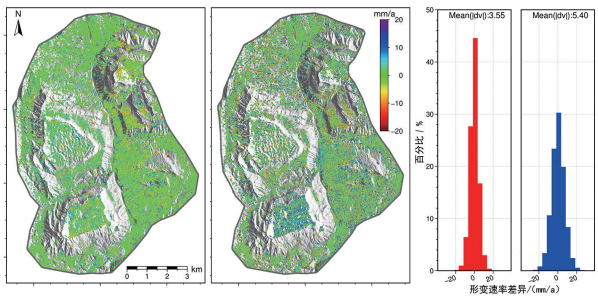


图13　LiDAR DEM与AW3D30、SRTM-3形变速率差异和统计直方图

4.5　DEM对形变序列的影响

对研究区内的两个较大的形变区和一个稳定区域进行形变序列对比分析，3个区域的TSI结果见图14~16。Q1点位于水城县发耳镇尖山营发耳煤矿，由于煤层开采形成采空区，坡体的应力场发生改变，岩体产生变形塌陷，光学影像上可以看出该区域存在多条地裂隙，坡体上有多条铲沟，坡脚存在大量的堆积碎屑，滑坡面积较大。由于地表发生了剧烈变化，在主坡体上并未选取到相干点，仅在上部未滑坡区域和下部碎屑提取到部分相干点。该区域长期处于不稳定变形状态，2018年5月后坡体形变速率发生多次改变，AW3D30、SRTM-3与LiDAR DEM的形变序列也开始出现差异。Q2位于水城县都格镇新盘村保兴煤矿，形变区域位于山体坡脚，不具备滑坡、崩塌等地质灾害发生的地表形态，因此推断该形变是由采矿活动引起的。然而地下矿产开采往往导致地表向下塌陷，图15中显示该区域地表出现了抬升形变，经查询，该矿场建设有瓦斯气发电站，瓦斯压力增大可能引起地表的抬升形变。该区域以45 mm/a的形变速率持续发生形变，LiDAR DEM与AW3D30、SRTM-3的形变序列基本一致。Q3点位于水城县鸡场镇旗帜村。TSI结果显示该点未发生形变，其累积形变序列仅有微弱的周期性变化，LiDAR DEM与AW3D30、SRTM-3的形变序列差异较小。

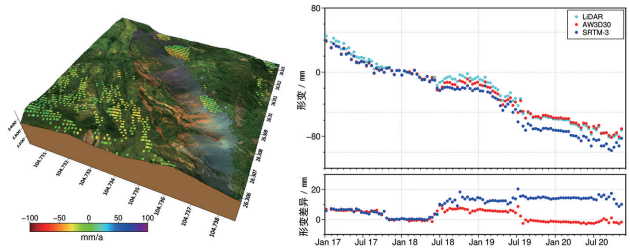


图14　Q1点TSI结果

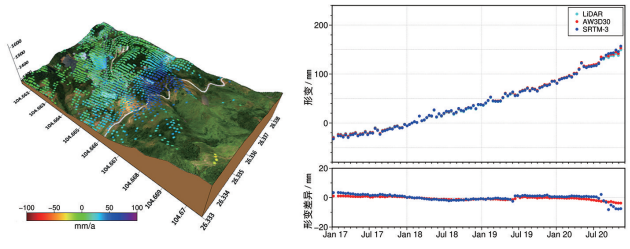


图15　Q2点TSI结果

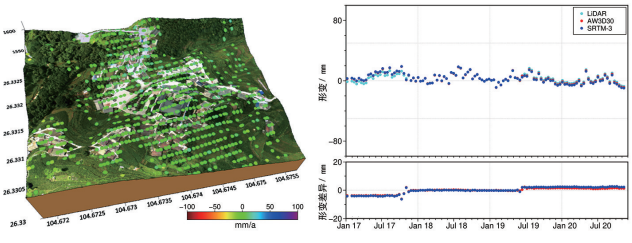


图16　Q3点TSI结果

AW3D30、SRTM-3与LiDAR DEM在3个区域形变序列差异见表3，在时间序列上SRTM-3与LiDAR DEM的差异更大，形变速率未发生变化的Q2和Q3点的形变序列差异明显小于发生了形变速率变化的Q1点。

表3　AW3D30、SRTM-3与LiDAR DEM的形变序列差异的平均绝对误差/mm

类型	Q1	Q2	Q3
AW3D30	3.57	0.96	1.39
SRTM-3	9.77	1.60	1.77

综上所述，DEM误差对形变序列估计的影响主要集中在形变速率发生变化的时刻：当地表形变速率稳定时，不同DEM获取的形变序列基本一致；当地表形变速率发生变化时，不同DEM获取的形变序列会出现阶跃式差异，并维持这一形变差异直至速率再次发生变化。

5 结 语

本文在贵州省兴仁县开展了D-InSAR和TSI滑坡探测对比分析，证明TSI具备抗误差干扰能力，能探测微小形变，并提供直观的形变序列演化趋势，为山区地质灾害隐患排查工作提供了重要的科学技术参考。同时，近年来大量雷达卫星数据的开放，为TSI分析提供了基础数据支持，充分满足大范围地质灾害普查工作的需求。TSI数据处理流程中需引入外部DEM模拟和去除地形相位，目前常用的公开DEM精度有限，可能对InSAR形变探测与分析产生不利影响。本文采用LiDAR DEM、AW3D30和SRTM-3等外部DEM在贵州省水城县开展了StaMPS-SBAS处理，通过对比分析相干点选取情况、DEM误差估计、形变速率和形变序列发现，StaMPS-SBAS方法无法完全剔除DEM误差，从而导致形变速率、形变序列估计存在一定偏差。因此，在开展精细化InSAR形变分析时，应尽可能选取高精度的外部DEM数据，以保证正确估计地质灾害隐患形变特征。

参考文献

[1] 郭振春. 贵州地质灾害的主要类型和诱因及其预防建议[J]. 贵州地质,2003,20(2):103-105

[2] 廖明生,王腾. 时间序列InSAR技术与应用[M]. 北京:科学出版社,2014

[3] Papadopoulos G A, Agalos A, Karavias A, et al. Seismic and Geodetic Imaging(D-InSAR) Investigation of the March 2021 Strong Earthquake Sequence in Thessaly, Central Greece[J]. Geosciences,2021,11(8):311

[4] Wempen J M. Application of D-InSAR for Short Period Monitoring of Initial Subsidence Due to Longwall Mining in the Mountain West United States[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2020, 30:33-37

[5] Dini B, Manconi A, Loew S. Investigation of Slope Instabilities in NW Bhutan as Derived from Systematic DInSAR Analysis[J]. Engineering Geology,2019,259:105 111

[6] Zebker H A, Villasenor J. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,1992,30(5):950-959

[7] Kimura H, Yamaguchi Y. Detection of Landslide Areas Using Satellite Radar Interferometry[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,2000,66(3):337-344

[8] Hooper A, Bekaert D, Spaans K, et al. Recent Advances in SAR Interferometry Time Series Analysis for Mmeasuring Crustal Deformation[J]. Tectonophysics, 2012, 514/517: 1-13

[9] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2000,38(5):2 202-2 212

[10] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2 375-2 383

[11] Werner C, Wegmuller U, Strozzi T, et al. Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping[C]// Proceedings of 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,2003:4 362-4 364

[12] Hooper A, Zebker H, Segall P, et al. A New Method for Measuring Deformation on Volcanoes and Other Natural Terrains Using InSAR Persistent Scatterers[J]. Geophysical Research Letters,2004,31:L23611

[13] Hooper A. Persistent Scatter Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation[D]. Stanford University,2006

[14] Hooper A, Segall P, Zebker H. Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2007,112:B07407

[15] 廖明生,张路,史绪国,等. 滑坡变形雷达遥感监测方法与实践[M]. 北京:科学出版社,2017

[16] Shi X G, Liao M S, Li M H, et al. Wide-area Landslide Deformation Mapping with Multi-path ALOS PALSAR Ddata Stacks: A Case Study of Three Gorges Area, China[J]. Remote Sensing,2016,8:136

[17] Zhao C Y, Kang Y, Zhang Q, et al. Landslide Identification and Monitoring Along the Jinsha River Catchment (Wudongde Reservoir Area), China, Using the InSAR Method[J]. Remote Sensing,2018,10:993

[18] 廖明生,董杰,李梦华,等. 雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测[J]. 遥感学报,2021,25(1):332-341

[19] Dong J, Zhang L, Tang M G, et al. Mapping Landslide Surface Displacements with Time Series SAR Interferometry by Combining Persistent and Distributed Scatterers: A Case Study of Jiaju Landslide in Danba, China[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 205:180-198

[20] Hu X, Wang T, Liao M S. Measuring Coseismic Displacements With Point-like Targets Offset Tracking[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(1): 283-287

[21] Dong J, Zhang L, Liao M S, et al. Improved Correction of Seasonal Tropospheric Delay in InSAR Observations for Landslide Deformation Monitoring[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 233:111 370

[22] Tantianuparp P, Balz T, Wang T, et al. Analyzing the Topographic Influence for the PS-InSAR Processing in the Three Gorges Region[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012:3 843-3 846

[23] Bayer B, Schmidt D, Simoni A. The Influence of External Digital Elevation Models on PS-InSAR and SBAS Results: Implications for the Analysis of Deformation Signals Caused by Slow Moving Landslides in the Northern Apennines (Italy) [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(5):2 618-2 631

[24] Japan Aerospace Exploration Agency. ALOS-2 Project / PALSAR-2[EB/OL]. [2021-03-22]. https://www. eorc. jaxa. jp/ALOS-2/en/about/palsar2. htm

[25] European Space Agency. Sentinel-1 SAR User Guide Introduction[EB/OL].[2021-03-22].https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar

[26] 许强，董秀军，李为乐. 基于天—空—地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2019，44(7):957-966

[27] Japan Aerospace Exploration Agency. ALOS Global Digital Surface Model “ALOS World 3D - 30m (AW3D30)”[EB/OL]. [2021-03-25]. https://www. eorc. jaxa. jp/ALOS/en/aw3d30/index. htm

[28] Farr T G, Kobrick M. Shuttle Radar Topography Mission Produces a Wealth of Data[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2000, 81(48):583-585

[29] Rabus B, Eineder M, Roth A, et al. The Shuttle Radar Topography Mission: A New Class of Digital Elevation Models Acquired by Spaceborne Radar[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2003, 57(4): 241-262

（上接第35页）

垒、数据利用低、业务响应慢、数据质量差、数据价值低等方面取得了一定成效。

随着信息技术的更加成熟，未来可获取的数据种类越来越多，数据应用的业务场景也更加复杂多样。数据中台应始终坚持以应用为导向，务实资源提供和深度应用能力，朝着数据更多样、底层更智能、上层更简单、应用更丰富的方向发展。另外，数据中台需协同各行业，共同丰富数据中台生态圈，不断迭代循环，优化时空数据资源，进一步提升数据应用服务能力，实现“用数据说话、用数据决策、用数据管理、用数据创新”，为南沙新区建设提供权威、全面、时效、安全的数据服务支撑。

参考文献

[1] 段志强，沈凤娇，黄冠宇，等. 智慧城市时空信息云平台建设研究[J]. 地理空间信息，2018，16(8):24-27

[2] 赵伟伟，王守东，贾凉，等. 地理信息中台在智慧城市中的应用:以南京市为例[J]. 工程勘察，2021，49(4):57-61

[3] 李广乾. 什么是数据中台？[J]. 中国信息界，2019(6):72-75

[4] 苏萌，贾喜顺，杜晓梦，等. 数据中台技术相关进展及发展趋势[J]. 数据与计算发展前沿，2019，1(5):116-126

[5] 周凯，胡佩茹. 国土空间规划的数据中台架构设计研究[J]. 智能城市，2020，6(2):108-110

[6] 王智，尹长林，许文强. 智慧城市背景下数据中台的研究与设计[J]. 网络安全和信息化，2021(7):29-35

[7] 国家基础地理信息中心. 自然资源三维立体时空数据库[J]. 地理信息世界，2021，28(2):127

[8] 薛梅，陈光，李锋，等. 一种基于地理实体的异构三维空间数据集成方法[J]. 测绘通报，2019(增刊2):247-252

[9] 刘天漪，钟志农，熊伟，等. 基于内存数据库的三维模型管理方法[J]. 地理信息世界，2017，24(2):88-93

[10] 陈龙，郭军，张建中. 三维模型轻量化技术[J]. 工矿自动化，2021，47(5):116-120

[11] 周玲. 基于参数化技术的数字城市三维建模方法[D]. 杭州：浙江大学，2013