

基于时序InSAR的西南科技大学地表形变监测与分析

鲁 魏, 杨 斌, 杨 坤

Surface deformation monitoring and analysis of Southwest University of Science and Technology based on time series InSAR

LU Wei, YANG Bin, and YANG Kun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202060>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于轨道精炼控制点精选的极艰险区域时序InSAR地表形变监测

Time series InSAR surface deformation monitoring in extremely difficult area based on track refining control points selection

潘建平, 邓福江, 徐正宣, 向淇文, 涂文丽, 付占宝 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 98-104

土质滑坡地表倾斜变形特征与基于MEMS的倾斜变形监测技术初探

Evolution of deformation and monitoring techniques of surface tilt for soil landslides using MEMS technique

刘晓宇, 樊智勇, 吴疆 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 69-77

基于MSBAS技术的金沙江上游色拉滑坡形变分析

Deformation analysis of Sela landslide in the upper reaches of Jinsha River based on MSBAS technology

熊国华, 杨成生, 朱赛楠, 董继红, 张勤 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 1-9

时序数据库技术在贵州地质灾害监测设备运行维护调度平台中的应用

Application of time series database in Guizhou Province geological disaster monitoring equipment operation maintenance scheduling platform

张家勇, 刘黔云, 邓卫卫, 龚伟, 张楠, 李程, 李潇, 胡屿 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 117-122

地下水渗流对崩坡积滑坡稳定性和变形的影响——以湖南安化春风滑坡群为例

Influence of groundwater seepage on stability and deformation of colluvial deposit landslide: taking Chunfeng Landslide group in Anhua County of Hunan Province as an example

贺小黑, 彭鑫, 谭建民, 裴来政 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 96-103

国产GB-InSAR在特大型水库滑坡变形监测中的应用

Application of GB-InSAR in deformation monitoring of huge landslide in reservoir area

郭延辉, 杨溢, 杨志全, 高才坤, 田卫明, 何玉童 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 66-72



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202060

鲁魏, 杨斌, 杨坤. 基于时序 InSAR 的西南科技大学地表形变监测与分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 61-72.

LU Wei, YANG Bin, YANG Kun. Surface deformation monitoring and analysis of Southwest University of Science and Technology based on time series InSAR[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 61-72.

基于时序 InSAR 的西南科技大学地表形变监测与分析

鲁 魏¹, 杨 斌^{1,2,3}, 杨 坤¹

(1. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 2. 国家遥感中心绵阳科技城分部, 四川 绵阳 621010; 3. 西南科技大学四川天府新区创新研究院, 四川 成都 610299)

摘要:以西南科技大学青义校区为研究区, 利用 SBAS-InSAR 和 PS-InSAR 对 52 景升轨 Sentinel-1A 雷达影像, 分别获取了研究区 2017 年 6 月至 2020 年 11 月的地表形变速率及时序形变量。结合相干性系数、形变速率、方差及标准差对两种时序 InSAR 结果进行检验对比, 从自然、人为因素两方面探讨了研究区地表形变机理与演化过程。结果表明: 研究区存在多处显著沉降, 最大垂直沉降速率可达 15 mm/a, 地表形变与学生公寓楼、道路扩建等人为因素有关, 地表沉降区与强降雨、岩性及地势地貌关联紧密, 地层界线与地表形变不显著相关。相较而言, 两种监测结果总体一致性较好, SBAS-InSAR 相比 PS-InSAR 的监测结果稳健性更好。

关键词: 时序 InSAR; 校区扩建; 地表形变; 强降雨; 岩性

中图分类号: P642.26 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2023)02-0061-12

Surface deformation monitoring and analysis of Southwest University of Science and Technology based on time series InSAR

LU Wei¹, YANG Bin^{1,2,3}, YANG Kun¹

(1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 2. Mianyang S & T City Division, National Remote Sensing Center of China, Mianyang, Sichuan 621010, China; 3. Tianfu Institute of Research and Innovation, Southwest University of Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610299, China)

Abstract: Taking Qingyi campus of Southwest University of Science and Technology as the study area, the surface deformation rate and time sequence variables of the study area from June 2017 to November 2020 were obtained by using SBAS-InSAR and PS-InSAR on 52 scene ascending Sentinel-1A radar images. Combined with coherence coefficient, deformation rate, variance and standard deviation, the results of two Time Series InSAR are tested and compared, and the mechanism and evolution process of surface deformation in the study area are discussed from two aspects of natural and human factors. The results show that there are many significant settlements in the study area, and the maximum vertical settlement rate can reaches 15 mm/a. The surface deformation is related to the factors such as student apartment buildings and road expansion. The surface settlement area is closely related to heavy rainfall, lithology and topography, and the stratigraphic boundary is not significantly related to

收稿日期: 2022-02-27; **修订日期:** 2022-08-02 **投稿网址:** <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201541); 四川省教育厅人文社会科学重点研究基地沱江流域高质量发展研究中心资助项目(TJGZL2019-12)

第一作者: 鲁 魏(1998-), 男, 四川都江堰人, 硕士研究生, 主要从事 InSAR 形变监测研究。E-mail: 18048535262@163.com

通讯作者: 杨 斌(1979-), 男, 新疆石河子人, 博士(后), 教授, 硕士生导师, 主要从事遥感科学与技术在地学领域中的综合应用研究。E-mail: xjgis@126.com

the surface deformation. In general, the two monitoring results are generally consistent, and the monitoring results of SBAS-InSAR are more robust than PS-InSAR.

Keywords: time series InSAR; campus expansion; surface deformation; rainfall; lithology

0 引言

21 世纪以来,随着国家高等教育招生规模的持续扩大,许多高校通过扩建、新建校区等方式来解决原有教育资源和发展空间不足的问题。在高校发展建设过程中,受到地层构造、降雨及动静载荷等自然与人为因素的扰动,出现不均匀地表形变现象,地表形变不仅威胁到高校基础设施安全,还为高校安全带来重大隐患。因此,研究高校地表形变的时空演化特征及其发展趋势,可为高校的校区安全评估、隐患排查、基础设施建设规划提供科学参考依据。

地表形变监测常用的方法有传统的大地水准测量和全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)^[1],由于这些监测方法劳动强度大,空间分辨率低及人工成本高等问题,难以实现大范围形变监测^[2]。星载合成孔径雷达干涉测量(Interferometric synthetic aperture radar, InSAR)因其高覆盖、高分辨率、高精度及全天候等特点^[3-4],已被广泛应用于地表形变监测^[5]、地震形变监测^[6]、滑坡早期识别^[7]等地灾监测领域。合成孔径雷达差分干涉技术(Differential interferometric synthetic aperture radar, D-InSAR)通过引入外部 DEM 或三轨/四轨差分来获取地表形变信息^[8],此技术在长时间跨度形变监测上存在局限性。为克服此局限性,提出了具有高精度、高空间密度、长时间尺度特点的时序 InSAR 技术(Time series InSAR, TSInSAR)。如 Berardino 等提出的小基线集技术(Small baseline subsets InSAR, SBAS-InSAR)^[9], Ferretti 等提出的永久散射体技术(Persistent scatterer InSAR, PS-InSAR)^[10]及其相关的演变技术。2019 年赵富萌等^[11]采用 SBAS-InSAR 技术成功获取了中巴公路盖孜河谷段 2016—2017 年的地表形变信息。2020 年潘建平等^[12]设计了一种改进的 SBAS-InSAR 技术进行地表形变监测,取得了较好的成果。张红峰^[13]等基于 PS-InSAR 技术提出基于分时散射体提取的改进算法,得到了非城区监测区的地表形变。时序 InSAR 技术能较好的克服时空失相干现象,减弱大气效应及地形相位的影响,能获取地表缓慢的形变信息^[14-15]。

目前针对高校区域形变研究多使用 GNSS 或单一时序 InSAR 技术提取,少有学者利用覆盖同一区域的雷达影像结合不同时序 InSAR 技术来获取高校的形变

分布特征,且从多方面详细分析高校地表形变成因。本文利用 SBAS-InSAR 和 PS-InSAR 对覆盖研究区的 2017 年 6 月至 2020 年 11 月的 52 景升轨 Sentinel-1A 影像分别进行处理,获取两种时序 InSAR 反演的形变速率及时序形变量。结合不同的时序 InSAR 进行地表形变监测,可交叉验证监测结果并增加可选性^[15]。选用合适的形变结果,从自然、人为因素两方面对研究区地表形变成因分析。以期为高校校区规划建设、地灾防控、建筑设施安全提供参考资料,为其形变监测提供借鉴。

1 研究区概况

西南科技大学位于四川省绵阳市(中国科技城),是四川省人民政府、国防科技工业局与教育部共建高校。现有青义校区、西山校区和城南校区三个校区,研究区位于绵阳市涪城区青义校区(校本部)。

西南科技大学青义校区东西长 2 000 m,南北宽 1 500 m,占地 272 000 m²,校舍建筑面积 1 150 000 m²,整个校区西高东低,地形原始地面坡度 10°~30°,其地理位置以及卫星遥感图像见图 1。校区处于山丘缓坡地带,属浅丘斜坡地貌,区域内有地质界线通过,以灰黄和紫红色粉质黏土、砂质泥岩、细砂岩及粉质黏土夹砂质泥岩碎块为主。研究区气候温和,雨量充沛,年降雨量达 963.2 mm,降雨具有短时强降雨量大、连续数日强降雨量大和降雨时间集中等特点^[16]。

2 数据和方法

2.1 数据源

Sentinel-1A 卫星是欧洲航天局“哥白尼计划”所研制的地球观测卫星,搭载 C 波段合成孔径雷达天线,可全天候获取连续数据,研究过程选取 Sentinel-1A 作为数据源。选取时间范围从 2017-06-07—2020-11-06 共 52 景升轨 Sentinel-1A 影像数据进行分析,时间间隔控制在两个重访周期以内,并选取多期历史 Google Earth 影像对校区内新建学生公寓楼工程时空演化过程进行分析。为校正 Sentinel-1A 数据的轨道误差,导入精密轨道数据(Precise orbit ephemerides, POD);采用分辨率为 30 m 的(Shuttle radar topography mission, SRTM)DEM 数据去除地形相位。同时为探讨降雨与研究区地表形变的相关性,收集了来自中国气象数据网(

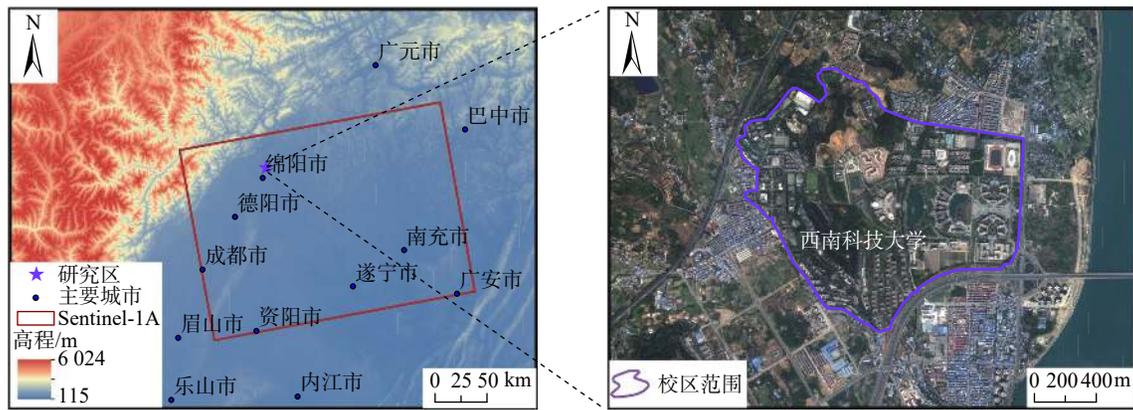


图 1 研究区地理位置及卫星影像

Fig. 1 Geographical location and satellite images of the study area

cma.cn/)2017—2020 年共 4 年的绵阳站逐日降雨资料。研究数据详细参数见表 1。

表 1 实验数据参数

Table 1 Parameters of the experimental data

数据名称	参数	值
Sentinel-1A	极化方式	VV
	轨道方向	升轨
	分辨率/m ²	5×20
	入射角/(°)	39
	重访周期/d	12
	雷达波长/cm	5.63
	幅宽/km	250
	时间间隔	2017-06-07—2020-11-06
SRTM	空间分辨率/m	30
中国气象数据网	气象站	56 196

2.2 时间序列 InSAR

常用的时序 InSAR 分析方法主要有三类, 分别为

SBAS-InSAR、PS-InSAR 和混合时序 InSAR^[17]。选取 SBAS-InSAR 和 PS-InSAR 进行相互验证, 并对比两种方法所得结果的稳健性, 以此获得更加准确可靠的形变信息。为分析同种数据采用不同时序 InSAR 所得结果的可靠性, 选取时间是 2019-08-08 的影像作为同一主影像。设置最大时间基线为 240 d, 最大空间基线占总基线 45% 的配置, 进行影像配准得到基线图如图 2。

干涉步骤中的相干性阈值为 0.35, 以避免干涉图质量较差。两种时序 InSAR 基本参数设置保持相同, 主要处理步骤都包括连接图生成、差分干涉处理、轨道精炼、反演估算及地理编码。SBAS-InSAR 的差分干涉处理主要是相干性生成、去平、3D 解缠和相位编辑, 将所有图像配准到超级主影像为轨道精炼和反演估算做数据准备。PS-InSAR 的差分干涉处理主要包括配准、干涉图生成、去平及振幅离差指数计算, 其中振幅离差

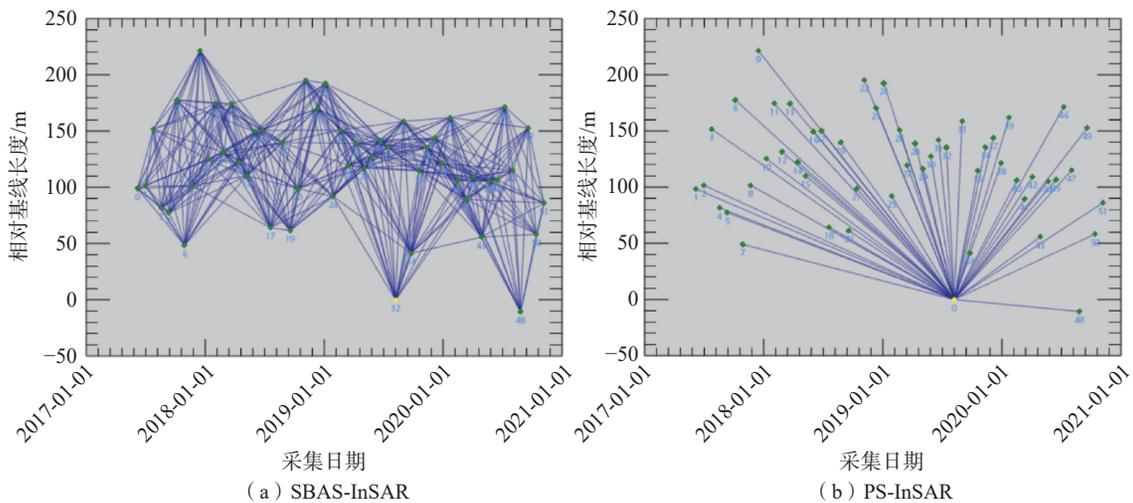


图 2 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 时空基线图

Fig. 2 Spatiotemporal baselines of PS-InSAR and SBAS-InSAR

指数(D)的计算公式为:

$$D = \frac{\mu}{\sigma} \quad (1)$$

式中: μ ——时序上的某个点的振幅平均值;

σ ——时序上的振幅的标准差。

在干涉处理中,干涉图中任意像素点的对应干涉相位都由多个相位分量组成:

$$\phi_{int} = \phi_{top} + \phi_{flat} + \phi_{atm} + \phi_{def} + \phi_{noi} \quad (2)$$

式中: ϕ_{int} ——干涉相位;

ϕ_{top} ——地形相位;

ϕ_{flat} ——椭球体相位;

ϕ_{atm} ——大气相位;

ϕ_{def} ——视线向形变相位;

ϕ_{noi} ——噪声相位。

时序 InSAR 可通过卫星轨道数据和外部 DEM 数据模拟得到椭球体、地形相位进行差分干涉,再经多次回归分析逐步移除其他相位成分,提取出形变信息。SBAS-InSAR 和 PS-InSAR 的区别在于,SBAS-InSAR 是将 SAR 影像根据空间基线大小分成若干个子集。通过最小二乘法获取单个子集的地表形变时间序列,再使用奇异值分解法(Singular value decomposition, SVD)将每个子集联合求解,从而得到完整监测时段内的地表形变时间序列^[18]。PS-InSAR 是利用覆盖同一区域的多景 SAR 影像,通过分析所有影像的幅度和相位信息,选取其中稳定性强,不易受时间失相干和空间失相干影响的点来作为永久散射体。以 PS 点作为分析目标进行建模,计算出每个 PS 点的形变信息,从而反演出整个监测区域的地表形变时间序列^[19],数据处理基本流程见图 3。

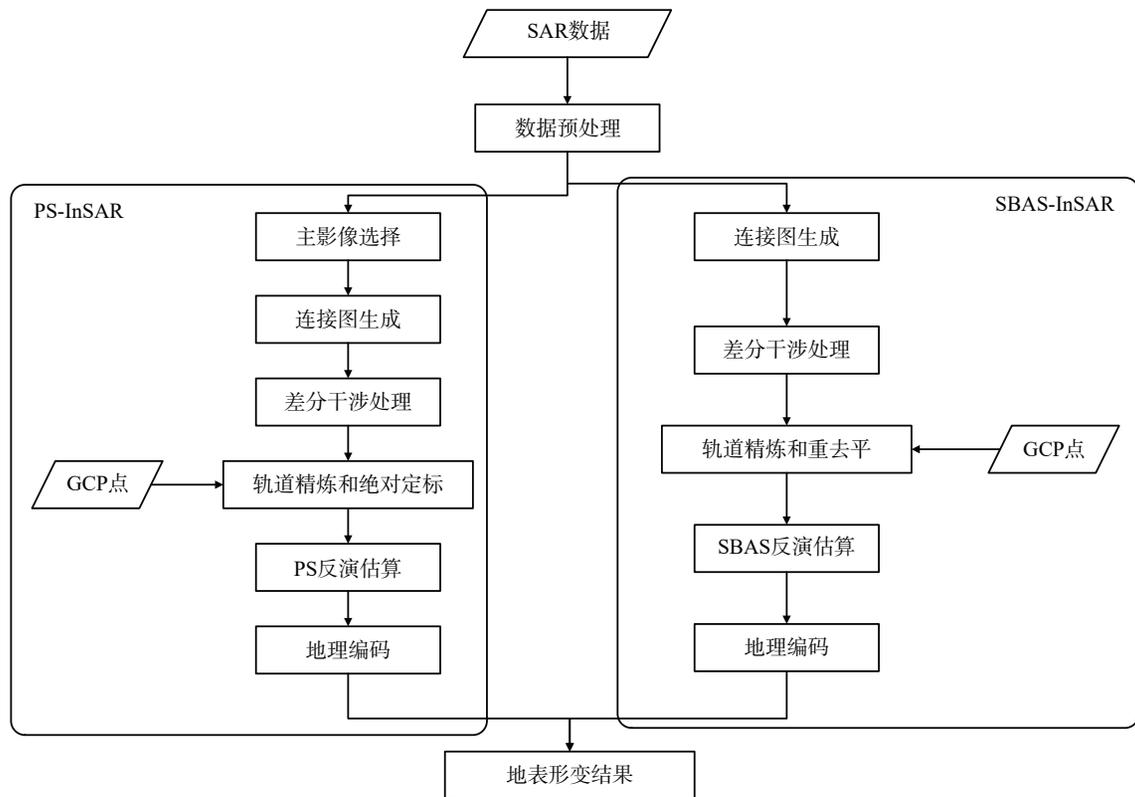


图 3 两种 InSAR 技术的基本流程图

Fig. 3 Flow chart of two InSAR

3 地表形变监测结果及评定

3.1 地表形变的分布

利用SBAS-InSAR 和PS-InSAR 对2017-06-07—2020-11-06 期间获取的覆盖研究区的升轨 Sentinel-1A 影像数据进行处理,得到研究区的形变特征如图 4。时序 InSAR 默认为雷达视线方向(Line of sight, LOS)的形变

量,将 LOS 向形变速率除以入射角的余弦值可将形变转换为垂直方向^[20],以便于后续分析。图中负值代表地表位移方向为远离卫星(即地表沉降),正值代表地表位移方向为靠近卫星(即地表抬升)。由图 4 知,研究区及周围地区存在明显的地表沉降,最大的沉降形变速率达 15 mm/a。在两种监测结果中,大部分区域的形变趋

势保持一致, 主要形变区域位于研究区西北方和东南方。部分区域两种时序 InSAR 的监测结果存在明显差别, 如图中区域 A 和区域 B。在图 4(a)中区域 A 和区域 B 形变特征明显, 图 4(b)中则缺失信息。主要原因是监测时间段内两区域存在工程建设地形地貌发生

改变, 使 PS-InSAR 缺乏作为永久散射体的高相干性点, 造成了失相干。单从整体的形变空间分布上看, PS-InSAR 技术形变细节特征明显, SBAS-InSAR 监测结果连续性更好。为进一步判断两种技术的优劣, 获取两种技术的统计直方图(图 5)进行分析。

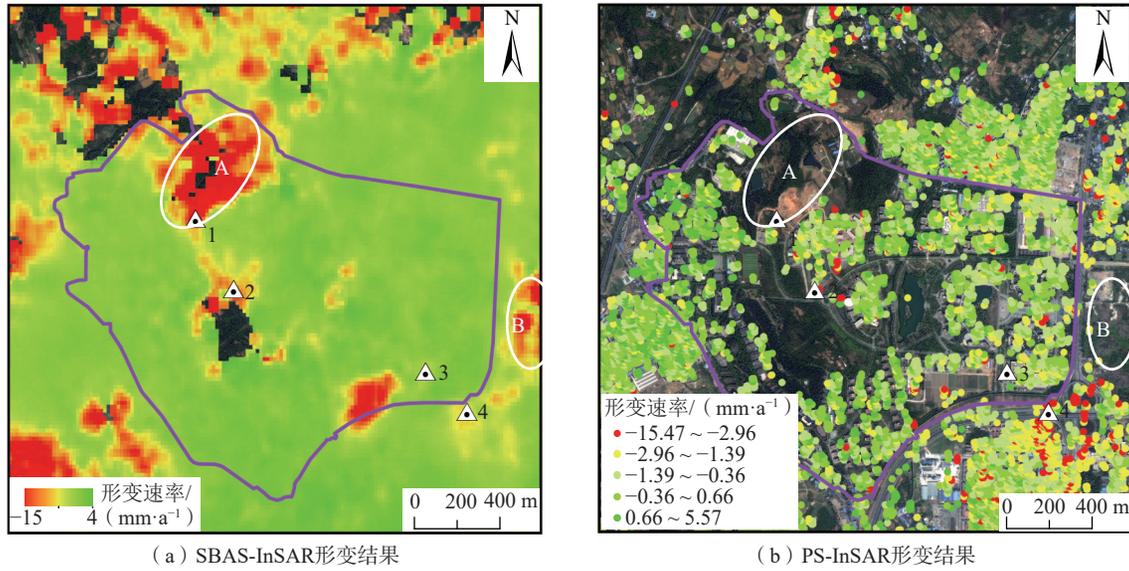


图 4 2017 年至 2020 年研究区地表垂直形变速率

Fig. 4 Vertical surface deformation rate of the study area from 2017 to 2020

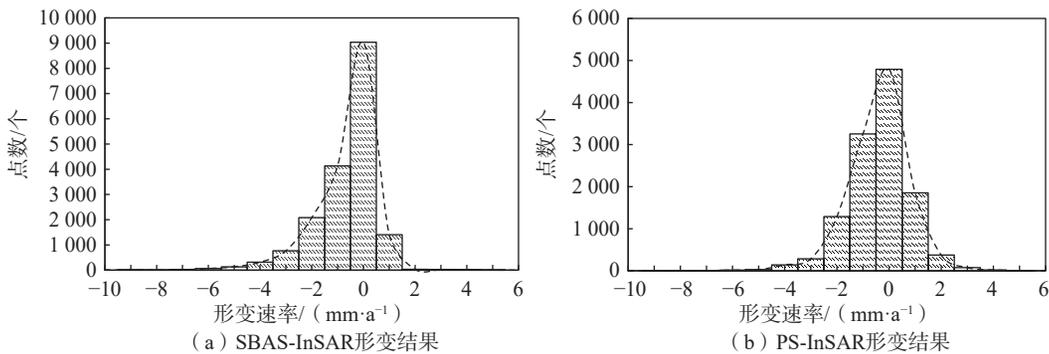


图 5 两种 InSAR 形变结果的统计直方图

Fig. 5 Statistical histograms of deformation results of two InSAR

由图 5 可得, 两种时序 InSAR 的统计直方图都呈正态分布, 监测结果形变速率范围在 0 mm 左右的矢量点数目居多, 监测期间内大部分区域保持稳定状态。对比 SBAS-InSAR 与 PS-InSAR 的统计直方图, 前者监测结果的矢量点数目较多, 后者形变速率的分布更为离散。结合图 4 可看出 SBAS-InSAR 监测结果的形变区域更明显, 形变速率的分布更为集中, 更直观的反映出区域地表形变特征。综上以 SBAS-InSAR 的监测结果为研究对象, 将 PS-InSAR 的监测结果作为补充验证, 对研究区的形变特征进行分析。由于时序 InSAR 的监

测结果质量受到相干性、粗差和地形等因素的共同影响, 为检验监测结果的可靠性, 从时序 InSAR 的相干性、形变速率精度、方差及标准差等方面进行验证。干涉处理时, PS-InSAR 的相干性图会进行拉伸变形, 难以进行准确分析, 所以 PS-InSAR 选用形变速率精度检验结果可靠性, SBAS-InSAR 则用相干性的高低检验数据可信度。

3.2 相干性及速率精度检验

在时序 InSAR 中, 相干性的好坏决定干涉像对的稳定程度, 相干性过低易发生时空失相干, 难以提取出

地表形变信息。为直观反映 SBAS-InSAR 的相干性高低, 选取在监测时间范围内时间间隔接近的相干性图进行分析, 如图 6 所示。图中颜色越浅区域, 相干性系数越大(值的范围为 0~1), 相干性越好, 干涉像对则更稳定。由图可知, 在时间间隔接近情况下, 5—9 月的相干性整体低于 10 月至次年 3 月的相干性。主要原因是 10 月至次年 3 月是属于植被非生长期, 而相干性系

数和植被生长周期呈负相关, 植被生长越茂盛时期, 相干性系数越低。且相干性系数也与时间基线呈负相关, 在同一区域, 时间基线越长, 相干性系数越低, 像对趋于失相干。故本文时序 InSAR 处理中, 时间基线选取控制在 1 月以内, 避免发生失相干。研究表明相干性良好, 研究区的相干性皆在 0.5 以上, 像对良好的相干性, 为提取到高质量的形变信息提供了保障。

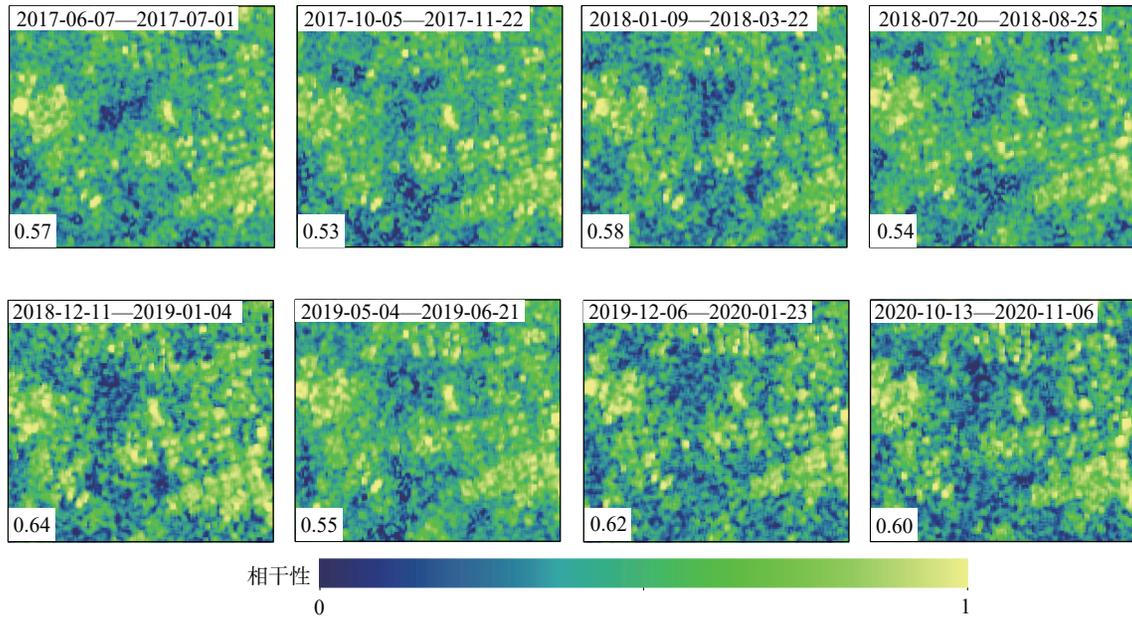


图 6 相干性系数图

Fig. 6 Diagram of coherence coefficient

对 PS-InSAR 监测结果的可靠性, 可通过形变速率精度来评定。提取出的形变速率精度值求出平均值为 0.524, 且方差和标准差分别为 0.015 和 0.126, 数据离散程度较小, 可知 PS-InSAR 的形变速率精度基本稳定分布在 0.5 左右, 证明 PS-InSAR 具有较高的形变速率精度, 监测结果可靠性较好。但只考虑时序 InSAR 的相干性高低和形变速率精度不能完整的证明形变监测结果的稳健性和可信度。为进一步验证时序 InSAR 的形变监测结果, 以下对比两种时序 InSAR 的时序沉降量, 并结合方差和标准差分析评定。

3.3 结果对比与检验

为验证 SBAS-InSAR 技术获取地表形变量的精度, 收集了在 2018-01-02—2020-08-15 期间研究区内 6 个水准点的监测数据, 得到水准监测点在监测期间的形变量如图 7。对比水准监测结果与 SBAS-InSAR 结果可知, 水准监测的地表形变量与 SBAS-InSAR 获取的地表形变量误差较小, SBAS-InSAR 获取的数据与水准监测结果最大误差为 4.3 mm 且两者获取的形变变化趋势相

近。结果表明 SBAS-InSAR 方法与水准监测结果一致性较好。

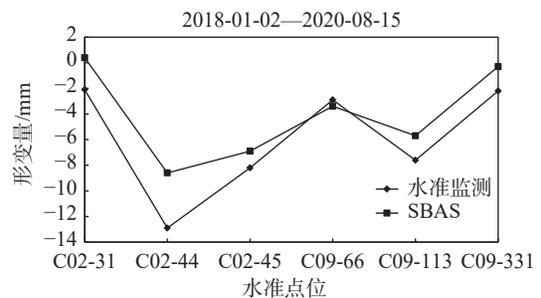


图 7 SBAS-InSAR 和水准监测结果对比

Fig. 7 Comparison of SBAS-InSAR and Leveling Monitoring Results

选取研究区范围内二者形变特征完整且较为显著的区域, 提取出时序形变量见图 8。在 (Statistical product service solutions) SPSS 软件中使用斯皮尔曼相关性分析法计算四个区域两种时序 InSAR 时序形变量的相关性大小, 得到两种时序 InSAR 的时序形变量相关性在区域 1 为 0.590, 区域 2 为 0.773, 区域 3 为 0.728,

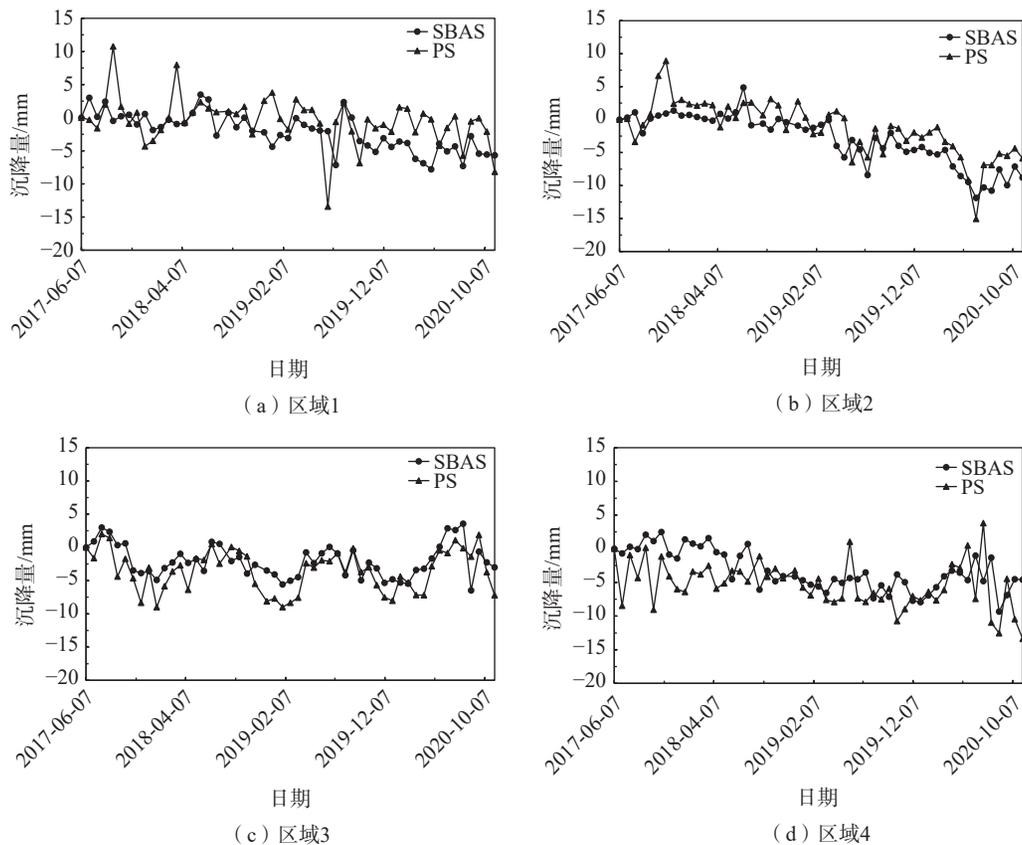


图8 四个区域对应的时序形变量

Fig. 8 Time series deformation of the four regions

区域4为0.584。综上,两种时序InSAR的时序形变量相关性较强,提取的时序形变量整体上趋于一致,且形变都表现为不同程度的沉降。存在略微差异,这是其不同的散射体方式导致的,整体上两种方法具有较好的一致性,间接验证了时序InSAR的可靠性。

方差和标准差能较好的反应数据的稳定性及离散程度,由表2可知,两种InSAR监测结果的方差和标准差都较小,监测结果的整体偏离度低,稳定性较好。SBAS-InSAR监测结果的相干性系数均值和矢量点个数均大于PS-InSAR,相干性系数越高,像对的相干性越好,后续反演地形形变精度也更高,矢量点个数越多,提取出的形变信息越多。且SBAS-InSAR监测结果的方差和标准差也小于PS-InSAR,表明SBAS-InSAR的监测结果相比PS-InSAR,稳健性更好,数据整体质量更

高。因此为了更全面和准确的分析研究区形变原因,选择形变空间分布更显著和均衡的SBAS-InSAR监测结果做后续进一步的研究讨论。

3.4 研究区的形变特征

地表沉降变形是一个长期缓慢的过程,为揭示监测期间地表的形变演化特征,利用SBAS-InSAR数据得到研究区的地表形变演化过程如图9。可以看出研究区及周围多处区域存在显著的形变,主要形变区域在研究区的西北方,且西南方和东方也存在不同程度的形变。2017—2020年间地表形变不断累积,2017年6月—2019年1月研究区及周围大部分区域处于稳定状态,2020年初形变区域显著扩大,至2020年11月6日形变量最大达45 mm。

4 形变成因探讨

4.1 降雨量

连续数日强降雨和短时强降雨是影响地质灾害发育的重要因素之一,强降雨汇聚的大量积水通过入渗地表软化岩土,增大岩土自重且降低岩土抗剪强度,促进了地面形变的发生。为探究降雨对研究区地表形变的

表2 形变矢量结果统计

Table 2 Statistics of deformation vector results

时序InSAR	矢量 点数/个	平均速率 $/(mm \cdot a^{-1})$	相干性 系数均值	方差	标准差
SBAS-InSAR	18 011	0.721	0.608	1.358	1.165
PS-InSAR	12 144	0.441	0.583	1.395	1.181

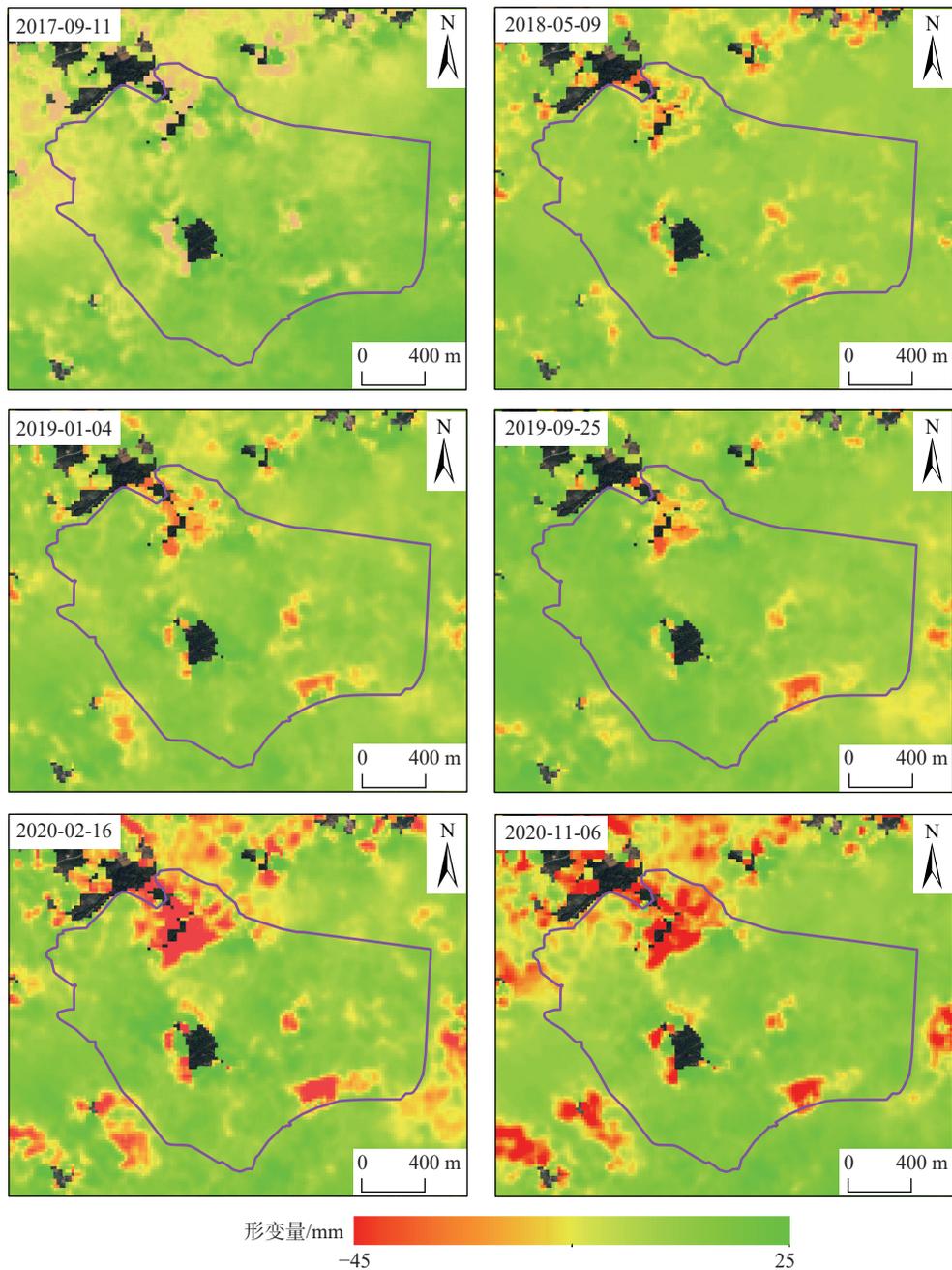


图 9 研究区的地表形变演化特征

Fig. 9 Evolution characteristics of surface deformation on the campus of SWUST

影响,对研究区 2017—2020 年共四年的逐日降雨数据进行移动平均处理,得到降雨量时间序列的变化趋势如图 10。再获取图 4(a)中区域 2、区域 3 和区域 4 的时序沉降量如图 11,用以分析降雨变化趋势和时序形变特征。对比降雨的移动平均曲线和时序形变量曲线可知,三个区域的地表形变特征和降雨变化规律整体上呈显著相关。2017 年,6—8 月降雨量骤增,同年 10 月至次年 1 月此间地面沉降显著,2 月到 6 月期间降雨减少,地面发生明显抬升。2018 年地表形变规律基本与

2017 年一致,2019 年降雨量相对较少,此时间段地表形变变化不显著。2020 年,6—8 月降雨量增加后,地表形变呈沉降趋势。究其原因是夏季降雨量骤增,汇聚的大量降水入渗地表,软化及饱和岩土,在增加岩土的自重同时降低了结构面的强度,加之人为活动与地表建筑的荷载,发生沉降现象;冬春季节降雨锐减,气温降低,岩土冻胀作用使地面抬升。且降雨导致的地表沉降和降雨规律不完全同步,是因降雨引起的地面形变一般存在滞后现象。绵阳地区冬春季节气温下降幅度较小,强降雨

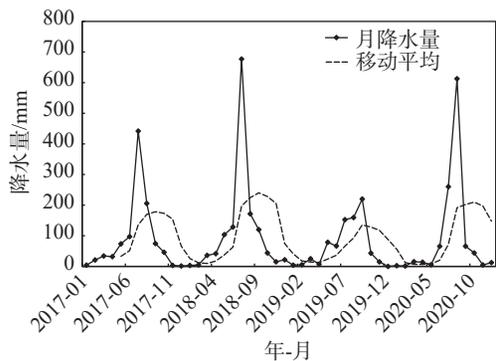


图 10 绵阳 2017—2020 年降雨变化趋势图

Fig. 10 Rainfall trend in Mianyang from 2017 to 2020

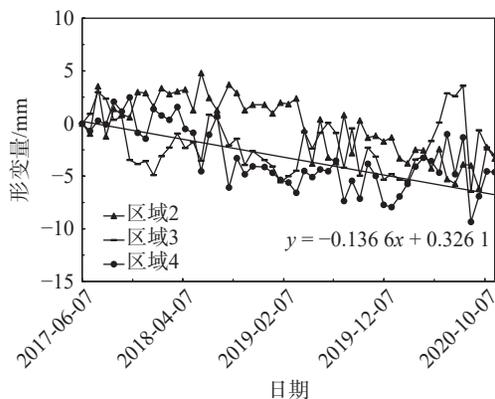


图 11 区域 2、区域 3 和区域 4 时序形变量

Fig. 11 Time series deformation for region 2, region 3 and region 4

对地面形变的影响大于温度变化,使三个区域地表形变整体上呈现沉降趋势。综上,降雨是西南科技大学校本部地表形变产生的重要因素之一。

4.2 建筑施工

中高层建筑施工是改变地形地貌的主要因素之一,地面沉降的演化过程会受建设施工的空间演化影响。图 4 中区域 A 和区域 B 在时序 InSAR 形变监测期间皆有中高层建筑施工影响,两区域施工建设的空间演化过程较为一致,以其中一个区域为例进行详细分析。选取覆盖研究区内区域 A 的历史多期光学影像对建设施工区域进行解译,得到区域 A 的施工建设演化过程如图 12。区域 A 是西南科技大学学生公寓楼扩建范围,2017 年 9 月—2018 年 5 月期间进行工程前期准备尚未开始地基建设,结合图 8 地表形变演化特征可知此时间段内地表形变的范围和幅度变化较小。2018 年 5 月—2019 年 1 月为土方开挖进行地基建设,期间地表形变幅度及范围缓慢增大。2019 年末建筑主体已全部完工,而 2020 年 2 月—2020 年 11 月期间地表形变范围和幅度显著增大。主要原因是地基阶段基坑土体开挖使

应力释放^[21],导致基坑周围土体发生位移并伴随不均匀沉降,学生公寓楼主体完工后,地面荷载骤增加之建筑主体位于斜坡面上导致形变程度进一步加大。区域 B 在 2019 年末开始施工,从地表形变演化特征(图 9)可知其建筑施工前地表形变幅度和范围变化不显著。此外为从量级和时序上分析形变特点,获取区域 A 和区域 B 中心点的时序沉降规律进行说明。

由图 13 可知,区域 A 整体上呈沉降趋势,在 2018 年 5 月前地表沉降幅度较小;2018 年 5 月—2019 年 11 月地表沉降幅度缓慢增大;2020 年期间地表沉降幅度明显增大,下沉速度加快。区域 B 整体沉降趋势较缓,2020 年 1 月后沉降速度略微增加,两区域时序形变规律与地表形变演化过程较为一致。综上所述,中高层建筑施工会引起研究区内一定幅度的地表形变,在对形变的发生造成影响的同时还会使形变的程度加剧。

4.3 地层岩性、地层界线及地势地貌

地表形变的发生是综合因素导致的,其中地势地貌、岩性及地层界线是产生地表形变现象的关键扰动因素。由图 14 可得,西南科技大学青义校区中部穿过了一条地层界线,观察发现地质界线上地表形变幅度较小且分布较少,与研究区的地表形变不显著相关。结合图 15 分析岩性可知,在由粉质黏土、粉土、砾石及砂黏物质为主的中更新统四级阶地冲洪积层上,地表沉降范围和幅度都较大。而在主要由砾石及砂黏物质构成的全新统冲洪积层上,除去区域 B(图 4)是因工程建设引起的地表沉降外,只有个别区域存在明显地表沉降。土层厚度和岩性的不均一性及地层的含水量和空隙率,是导致地表形变在空间上不均匀分布的主要原因。中更新统四级阶地冲洪积层中的粉土、粉质黏土及多层砾石等结构可压缩性较高,且校园生活用水主要为地下水,长期抽取地下水导致含水层上覆土层空隙水空隙水压力减小,破坏了岩土力学平衡,从而发生地表沉降^[22]。全新统冲洪积层简单的地层构造加之区域内地下水较少,因此区域内地表沉降现象不显著。上述表明岩性及其构成与地表形变呈显著相关,且不同的土层厚度和岩性引起地表形变量级不同。再者研究区处于山丘缓坡地带,整体地势西高东低,由于降雨、建筑施工等原因改变了边坡原有的稳定性,斜坡的局部稳定性受破坏倾向于不稳定斜坡发展,进而促使了地表形变的发生。

5 结论

本文利用时序 InSAR 技术对覆盖西南科技大学青

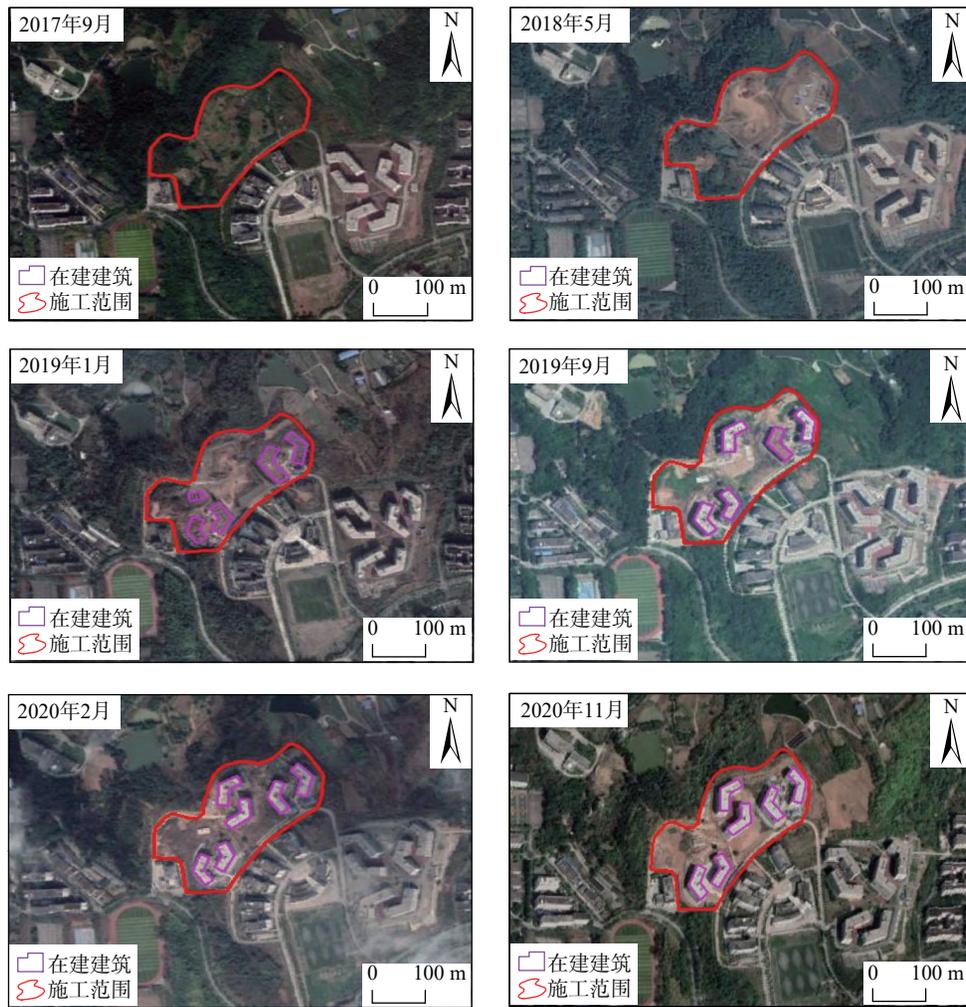


图 12 区域 A 工程建设空间演化过程

Fig. 12 Spatial evolution process of project construction in region A

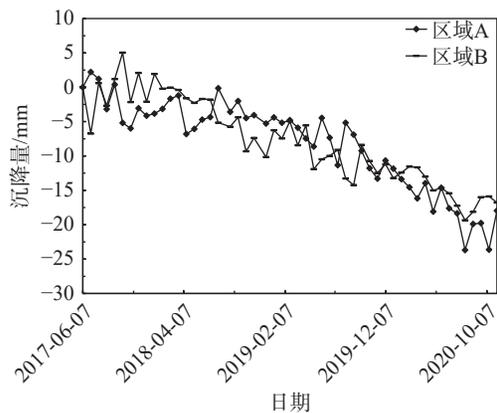


图 13 区域 A 时序形变量

Fig. 13 Time series deformation of region A

义校区的 52 景升轨 Sentinel-1A 影像进行了处理, 获取了西南科技大学青义校区 2017 年 6 月 7 日—2020 年 10 月 11 日的地表形变信息, 对地表形变时空演化规律和诱发因素进行了详细分析, 得到以下结论:

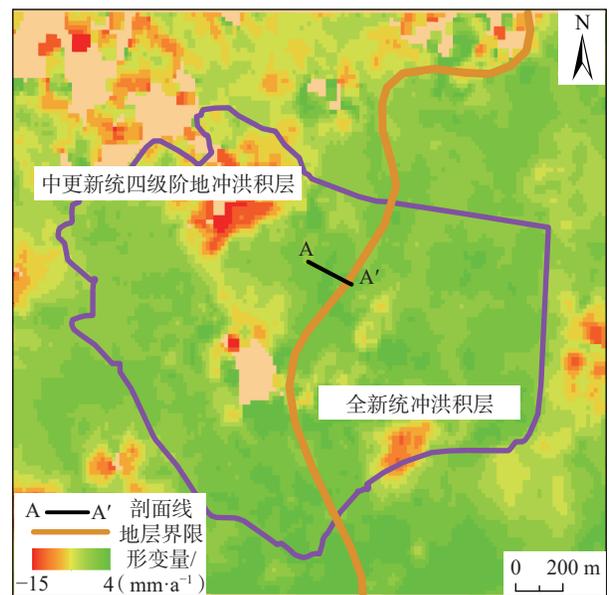


图 14 西南科技大学校本部地层界线与地表变形的叠加图

Fig. 14 Superposition of strata boundary and surface deformation at the campus of SWUST

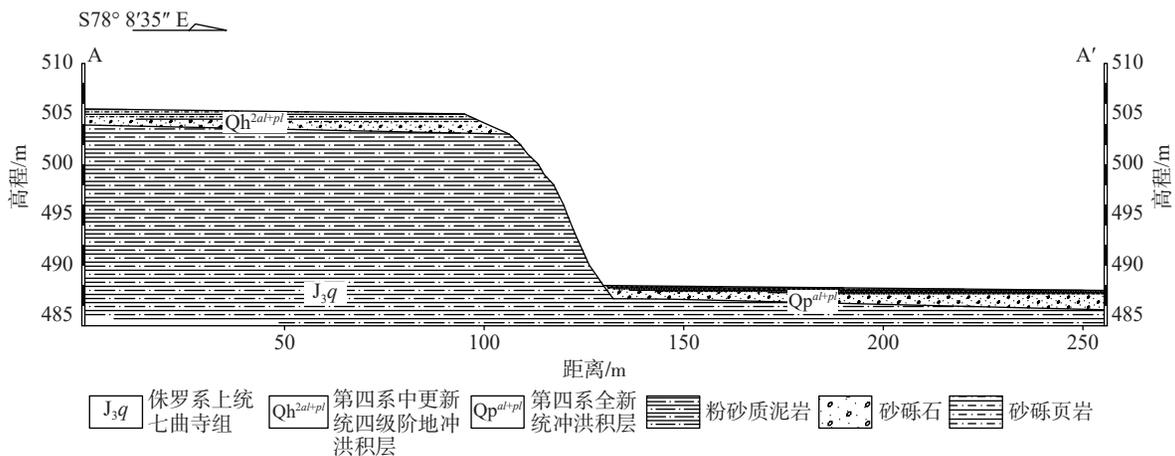


图 15 AA'地质剖面图

Fig. 15 AA' geological profile

(1)西南科技大学青义校区及周围区域在 2017 年 6 月—2020 年 10 月存在多处显著沉降, 主要沉降区域在西南科技大学青义校区的西北方, 其中最大垂直沉降速率可达 15 mm/a。

(2)时序 InSAR 相干性及速率精度检验显示, 两种时序 InSAR 技术获得的形变信息可靠性较高, 总体结果一致性较好。SBAS-InSAR 监测结果的方差和标准差皆小于 PS-InSAR, SBAS-InSAR 的监测结果稳健性更好, 数据整体质量较高。

(3)西南科技大学青义校区的地表形变与学生公寓楼、道路扩建等人为因素有关, 自然因素中, 地表沉降区与强降雨、岩性及地势地貌关联紧密, 地层界线与地表形变不显著相关。

参考文献(References):

- [1] 侯安业, 张景发, 刘斌, 等. PS-InSAR 与 SBAS-InSAR 监测地表沉降的比较研究 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2012, 32(4): 125–128. [HOU Anye, ZHANG Jingfa, LIU Bin, et al. Comparative study on monitoring surface subsidence with PS-InSAR and SBAS-InSAR [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(4): 125–128. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 史绪国, 张路, 许强, 等. 黄土台塬滑坡变形的时序 InSAR 监测分析 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(7): 1027–1034. [SHI Xuguo, ZHANG Lu, XU Qiang, et al. Monitoring slope displacements of loess terrace using time series InSAR analysis technique [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1027–1034. (in Chinese with English abstract)]
- [3] DONG Jie, ZHANG Lu, TANG Minggao, et al. Mapping landslide surface displacements with time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: A case study of Jiayu landslide in Danba, China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 205: 180–198.
- [4] 张凯翔. 基于“3S”技术的地质灾害监测预警系统在我国应用现状 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(6): 1–11. [ZHANG Kaixiang. Review on geological disaster monitoring and early warning system based on “3S” technology in China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(6): 1–11. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 潘光永, 陶秋香, 陈洋, 等. 基于 SBAS-InSAR 的山东济阳矿区沉降监测与分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(4): 100–106. [PAN Guangyong, TAO Qiuxiang, CHEN Yang, et al. Monitoring and analysis of sedimentation in Jiyang mining area of Shandong Province based on SBAS-InSAR [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(4): 100–106. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 李丹, 杨斌, 陈财. 基于 Sentinel-1A 数据反演九寨沟地震地表形变场 [J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(6): 1141–1148. [LI Dan, YANG Bin, CHEN Cai. Obtaining coseismic deformation field of Jiuzhai earthquake with sentinel-1A [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(6): 1141–1148. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李军, 褚宏亮, 李滨, 等. 基于高分影像与 InSAR 解译的西藏林芝则隆弄高位链式地质灾害发育特征分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(3): 42–50. [LI Jun, CHU Hongliang, LI Bin, et al. Analysis of development characteristics of high-elevation chain geological hazard in Zelongnong, Nyingchi, Tibet based on high resolution image and InSAR interpretation [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(3): 42–50. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR 变形监测方法与研究进展 [J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1717–1733. [ZHU Jianjun,

- LI Zhiwei, HU Jun. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1717–1733. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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): 2375–2383.
- [10] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8–20.
- [11] 赵富萌, 张毅, 孟兴民, 等. 基于小基线集雷达干涉测量的中巴公路盖孜河谷地质灾害早期识别 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(1): 142–152. [ZHAO Fumeng, ZHANG Yi, MENG Xingmin, et al. Early identification of geological hazards in the Gaizi Valley near the Karakoran Highway based on SBAS-InSAR technology [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(1): 142–152. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 潘建平, 邓福江, 徐正宣, 等. 基于轨道精炼控制点精选的极艰险区域时序InSAR地形表变监测 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(5): 98–104. [PAN Jianping, DENG Fujiang, XU Zhengxuan, et al. Time series InSAR surface deformation monitoring in extremely difficult area based on track refining control points selection [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 98–104. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张红峰, 刘瀛. 基于改进PSInSAR技术的非城区地表形变监测 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2021, 41(6): 568–571. [ZHANG Hongfeng, LIU Ying. Non-urban surface deformation monitoring based on improved PSInSAR [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2021, 41(6): 568–571. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张本浩, 魏云杰, 杨成生, 等. 西藏然乌地区地质灾害隐患点InSAR识别与监测 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(1): 18–26. [ZHANG Benhao, WEI Yunjie, YANG Chengsheng, et al. InSAR identification and monitoring of geological hazards in Ranwu region of Tibet [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(1): 18–26. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 许强, 蒲川豪, 赵宽耀, 等. 延安新区地面沉降时空演化特征时序InSAR监测与分析 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(7): 957–969. [XU Qiang, PU Chuanhao, ZHAO Kuanyao, et al. Time series InSAR monitoring and analysis of spatiotemporal evolution characteristics of land subsidence in Yan'an new district [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(7): 957–969. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 董廷旭, 可华明. 绵阳市涪城区耕地景观格局时空演变特征分析 [J]. *西南科技大学学报*, 2013, 28(3): 16–23. [DONG Tingxu, KE Huaming. The temporal evolution of landscape pattern for cultivated land in hilly area of northwest Sichuan [J]. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2013, 28(3): 16–23. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 张路, 廖明生, 董杰, 等. 基于时间序列InSAR分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别——以四川丹巴为例 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(12): 2039–2049. [ZHANG Lu, LIAO Mingsheng, DONG Jie, et al. Early detection of landslide hazards in mountainous areas of west China using time series SAR interferometry: A case study of Danba, Sichuan [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2039–2049. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 蒲川豪, 许强, 赵宽耀, 等. 利用小基线集InSAR技术的延安新区地面抬升监测与分析 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(7): 983–993. [PU Chuanhao, XU Qiang, ZHAO Kuanyao, et al. Land uplift monitoring and analysis in Yan'an new district based on SBAS-InSAR technology [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(7): 983–993. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 胡波, 汪汉胜. 用PSInSAR技术监测地面沉降研究 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2010, 30(2): 34–39. [HU Bo, WANG Hansheng. Monitoring ground subsidence with permanent scatterers interferometry [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 30(2): 34–39. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 冯文凯, 顿佳伟, 易小宇, 等. 基于SBAS-InSAR技术的金沙江流域沃达村巨型老滑坡形变分析 [J]. *工程地质学报*, 2020, 28(2): 384–393. [FENG Wenkai, DUN Jiawei, YI Xiaoyu, et al. Deformation analysis of Woda Village old landslide in Jinsha River Basin using SBAS-InSAR technology [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(2): 384–393. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 马德云, 南锟, 宋佳, 等. 某超期深基坑对周边建筑物沉降影响的研究 [J]. *建筑科学*, 2014, 30(11): 112–116. [MA Deyun, NAN Kun, SONG Jia, et al. Study on influence of deep foundation pit excavation to adjacent building [J]. *Building Science*, 2014, 30(11): 112–116. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 于军, 武健强, 王晓梅, 等. 基于“区域分解”思想的苏锡常地区地面沉降相关预测模型研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2004, 31(4): 92–95. [YU Jun, WU Jianqiang, WANG Xiaomei, et al. Research on the correlative prediction model with a regional decomposition base of the land subsidence in the Suzhou-Wuxi-Changzhou area [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2004, 31(4): 92–95. (in Chinese with English abstract)]