

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.06.02

“空-天-地”一体化技术在滑坡隐患早期识别中的应用 ——以兰州普兰太公司滑坡为例

侯燕军, 周小龙, 石鹏卿, 郭富赞
(甘肃省地质环境监测院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 长时间序列 SBAS-InSAR 形变监测, 能够减弱误差带来的影响, 提高监测精度, 有效识别地质灾害隐患。研究获取了兰州地区 2019 年 9 月至 2020 年 4 月的 L 波段升轨 ALOS-2 编程数据, 利用“空-天-地”一体化地质灾害监测体系, 基于小基线集 (SBAS-InSAR) 技术对兰州市普兰太有限公司滑坡进行了有效识别。经现场核查, 滑坡宏观变形迹象明显, 并与同期 C 波段 Sentinel-1A 升轨数据处理对比分析, 表明基于 L 波段的 SBAS-InSAR 形变监测在兰州市典型滑坡早期识别中发挥了很好的作用, 可以在区域滑坡早期识别中推广应用。

关键词: “空-天-地”一体化; 早期识别; 地质灾害; SBAS-InSAR

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)06-0012-09

Application of “Air-Space-Ground” integrated technology in early identification of landslide hidden danger: taking Lanzhou Pulantai Company Landslide as an example

HOU Yanjun, ZHOU Xiaolong, SHI Pengqing, GUO Fuyun
(Gansu Institute of Geological Environment Monitoring, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: The deformation monitoring of SBAS-InSAR with long time series can reduce the influence of errors, improve the monitoring accuracy, and effectively identify the hidden danger of geological disasters. The programming data of L-band elevated orbit ALOS-2 in the main urban area of Lanzhou from September 2019 to April 2020 were obtained in this study. The landslide of Lanzhou Pulantai Co., Ltd. was effectively identified based on the small baseline set (SBAS-InSAR) technology by using the integrated geological disaster monitoring system of “integration of Air-Space-Ground”. Through on-site verification, the macroscopic deformation signs of the landslide are obvious, and the comparison and analysis with the sentinel-1A orbit rising data processing of the C-band during the same period show that the Deformation monitoring of SBAS-InSAR based on the L-band plays a very good role in the early identification of typical landslides in Lanzhou City, and can be popularized and applied in the early identification of regional landslides.

Keywords: integration of “Air-Space-Ground”; early identification; geological disaster; SBAS-InSAR

收稿日期: 2020-08-23; 修订日期: 2020-09-24

基金项目: 甘肃省科技重大专项 - 社会发展类 (19ZD2FA002)

第一作者: 侯燕军 (1979-), 甘肃秦安人, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事水文地质、地质灾害、地质环境评价、地质灾害信息化建设等方面的研究。E-mail: tighyj@163.com

通讯作者: 周小龙 (1995-), 男, 甘肃漳县人, 遥感科学与技术专业, 本科, 助理工程师, 主要从事遥感技术在地质灾害防治方面的应用研究。E-mail: zhoulong-giser@163.com

0 引言

黄土高原地区是以黄土为主体的区域地貌,在以新构造活动为主的内动力和流水为主的外动力作用下形成的黄土高原地貌,为地质灾害的形成提供了空间条件,再加上特殊的气候条件、植被属性和土体特征,决定了地质灾害在区域空间上的分布^[1],因此黄土高原地区极易发生地质灾害,严重威胁到人民群众生命财产安全。

兰州地处黄土高原西部,属于黄河上游地区,青藏高原隆起区的东北边缘,青藏高原和黄土高原的交会处,市区属特殊的“两山夹一谷”的河谷地貌^[2-3]。南北两山以中低山、黄土丘陵地貌为主,主城区处于黄河的Ⅰ—Ⅳ级阶地,黄土与红层、基岩构成的二元结构斜坡特征,阶地马兰黄土、冲积土形成的多层结构斜坡,构成了地质灾害形成的基本条件;城区范围滑坡、崩塌呈带(片)状分布,且集中分布于人类活动强烈的城区河谷高阶地前缘,主要发育在第四系及中、新生界的软弱泥岩地层中^[4]。特定的地质环境和人类不合理的工程经济活动加剧了地质灾害易发程度,再加上暴雨集中,水土流失严重,大部分属强度侵蚀区,促使滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害频发,地质灾害类型及发育特征具有鲜明特色^[5-7]。兰州市是全国地质灾害最为严重的省会城市之一^[8],面对如此严重的地质灾害,需要新技术、新方法的探索应用来提高监测水平。

合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术能够全天时、全天候、大区域地采集包含振幅信息和相位信息的数据,在高精度地表形变信息特征提取和分析中应用广泛,常被用来研究地震、地质灾害、矿区等的形变特征的监测^[9-12]。2000年,FERRETTI等^[13]首次提出了永久散射体差分干涉测量技术(PS-InSAR)。2001年,FERRETTI等^[14]利用PS-InSAR技术ERS雷达数据监测安科纳发生的滑坡,并通过与水准数据分析对比,充分证明了PS-InSAR技术在滑坡监测应用中的可靠性。2002年,BERARDINO等^[15]提出了短基线集技术(SBAS-InSAR),可利用时间与空间基线阈值法构成干涉对,可进一步削弱空间失相关的影响。与永久散射PS-InSAR等技术相比,在SAR影像数据缺乏的情况下,SBAS-InSAR干涉方法更加适合区域形变监测与分析,SBAS-InSAR能够较好地克服时空失相干限制,获得大范围mm级精度的地表形变信息^[16]。许强等^[17]提出的“空-天-地”一体化地质灾害早期识别与监测体系,能够从根本上解决“隐患点在哪里”“什么时候可能发生”这两

个关键问题。本文选用SBAS-InSAR“空-天-地”一体化早期识别技术对兰州地区地质灾害进行识别探测,及时捕捉地质灾害的特征信息,为兰州地区地质灾害的防治提供可靠资料和科学依据。

本文利用“空-天-地”一体化地质灾害监测体系,使用L波段SBAS-InSAR早期识别技术对兰州地区黄土边坡地质灾害隐患进行识别,成功探测发现了兰州市普兰太电光源公司滑坡隐患,结合空域无人机测绘与实地调查核查,及时有效的做了防治方案,保障了人民群众生命财产安全。通过实地调查核查和C波段Sentinel数据对比验证的方法,表明L波段InSAR技术能够有效识别兰州黄土边坡地质灾害隐患,可以在黄土区域地质灾害早期识别中应用推广,为兰州黄土地区地质灾害防灾减灾提供科学依据。

1 技术方法

许强等人提出的“空-天-地”一体化地质灾害早期识别与监测体系能够很好的破解地质灾害领域难题。本文选用“空-天-地”一体化地质灾害早期识别与监测技术体系,首先通过星载InSAR遥感手段对研究区域地质灾害进行广域范围形变监测普查,圈定解译疑似变形区域和重大风险隐患点;然后利用空域无人机手段进行倾斜摄影测量详查;最后对疑似变形区域和重大风险隐患点实地调查核查;对专业人员综合判断与确认为重大风险的隐患点进行地面专业设备监测,实时获取并分析监测数据,继而进行监测预警,实现对致灾体的“空-天-地”一体化多源数据监测。

“空-天-地”一体化中的“空”是指航空遥感技术,主要是搭载于航空器上的传感器获取的数据,包括无人机倾斜摄影、机载激光雷达、机载SAR等,其变形监测精度为厘米-分米级;“天”是指航天遥感技术,主要是搭载于卫星上的传感器获取的数据,包括光学卫星和雷达卫星等,光学卫星用于大范围平面形态的监测,雷达卫星主要用来早期识别隐患普查和形变过程监测,其监测精度为毫米-厘米级;“地”是指地基观测技术,主要是通过地面传感器获取的数据,包括地基合成孔径雷达、三维激光扫描、地表位移变形监测等,其监测精度为厘米-毫米级。所谓“空-天-地”一体化是指综合运用卫星遥感技术、无人机技术和地面监测技术对地质灾害点开展多参数多手段监测,通过各种监测方法的优势互补,实现对致灾体的高精度全方位同步监测(图1)。

1.1 “天”—SBAS-InSAR早期识别

“天”是指航天遥感技术,主要是搭载于卫星上的

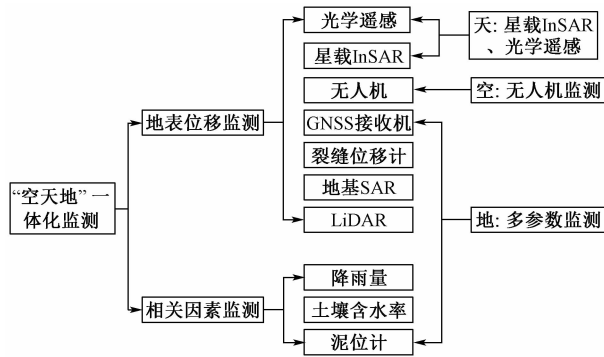


图1 “空-天-地”一体化监测体系

Fig.1 “Air-Space-Ground” integrated monitoring system

传感器获取的数据,包括光学卫星和雷达卫星等,光学卫星用于大范围平面形态的监测,雷达卫星主要用来早期识别隐患广域普查和形变过程监测,其监测精度为毫米-分米级。

广域范围内地质灾害隐患的早期识别是地质灾害防治工作中的一项关键任务,基于星载合成孔径雷达(InSAR)重复轨道观测的时间序列雷达干涉测量技术在此领域具有巨大的应用潜力^[18]。小基线技术(Small Baseline Subset, SBAS),是由 Berardino 等人提出的,主要用于研究低分辨率、大尺度形变。SBAS-InSAR 能够有效避免空间失相关,减小地形因素对差分相位干涉带来的影响,得到研究区内地表形变时间序列图。采用奇异值分解(SVD)的方法,将小基线组连接起来,解决了时间上采样稀疏的问题,又结合稳定散射体的干涉相位信息,得到更高精度的空间分辨率;从而得到覆盖整个观测时间的形变序列和平均沉降速率^[19-20]。与永久散射 PS 等技术相比,SBAS-InSAR 方法可以获取的形变序列在时间和空间上更为连续,在地质灾害大范围普查与监测中具有极大优势^[21]。

小基线集方法处理的步骤如下^[22](图2):

(1)同一研究区域相同轨道数据进行数据配准、多视等预处理,进行干涉对组合,生成小基线集干涉对,去除地形相位得到干涉图^[23]。

(2)根据相位相干性系数图,选择高相干点,进行相位解缠和定标处理。

(3)建立时段平均形变速率、高程地形误差和差分干涉相位的模型方程组。

(4)利用奇异值分解(SVD)方法求得未知参数的最小二乘解,将多主影像转成单主影像。

(5)估计非线性形变和大气相位。

(6)生成区域形变速率成果和形变量成果图。

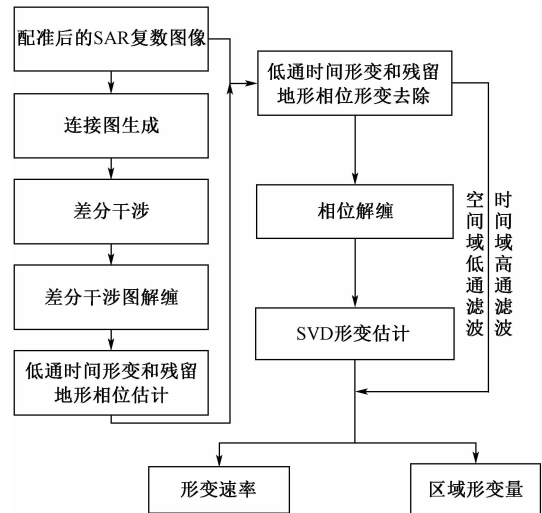


图2 SBAS 数据处理流程图

Fig.2 SBAS data processing flow chart

1.2 “空”—地质灾害隐患点无人机数据采集

无人机能够在滑坡区域大面积快速测绘成图,利用高清影像识别分析灾害体的形态特征,结合DEM数据分析滑坡的形态特征,为调查人员和专家决策提供准确的数据基础。

无人机具有机动灵活、高分辨率的特点,是传统遥感技术所无法比拟的,它可以用于地质灾害调查、监测、预警、评估的全过程。随着无人机遥感技术的进一步完善和科学技术的进步,已成为地质灾害调查及环境监测等遥感应用不可缺少的重要技术手段^[24]。无人机遥感与传统地质环境监测手段相比具有时效性强、数据精度高和监测面积大的优势,是地质环境管理中的强有力的武器^[25]。

“空-天-地”一体化地质灾害监测中高精度(厘米级)的垂直航空摄影测量和倾斜摄影测量数据是利用无人机手段获取,并且能快速生成测区4D产品(数字地形图DEM、数字正射影像图DOM、数字地表模型DTM、数字地面模型DSM),为一体化监测提供高精度空域测绘数据。利用无人机测绘技术进行地质灾害隐患调查具有方便快捷、直观形象等特点,必将成为地质灾害隐患调查分析的重要手段^[17]。

1.3 “地”—地质灾害点地面调查核查和重大灾害点地面设备监测

“以人为本、预防为主”是地质灾害防灾避灾原则,对早期识别中发现的疑似地质灾害隐患点进行实地调查核查,核查内容主要包括地质灾害体的发育过程及其稳定性认识,调查过程中主要收集该区域地质构造、地层岩性、地形地貌、水文特征、气象等相关资

料,并利用简单设备进行大致测量,以此确定地质灾害体的基本特征、稳定状态、发展趋势和防治建议,为划分地质灾害危分区,论证地质灾害发生的危险性提供依据^[25]。

专业技术人员进行实地核查时,如果形变速率较大或已加速变形,对周边人员和财产造成严重威胁的,则应加强群测群防和及时布设地面传感器,对致灾体地表和内部进行精确监测,实时收集并分析传感器数据,根据监测结果设定预警阈值,当数据发生变化超过限定预警阈值则发出预警信息,及时撤离人员保障生命财产安全,防患于未然。

利用“空-天”监测手段仅是从外貌特征、形变速率进行地质灾害隐患的识别,因受多种因素影响和条件限制,其识别结果并不一定完全正确,可能会出现误判^[13]。因此,利用遥感技术识别出来的地质灾害隐患点还需要专业调查人员实地调查核查,甄别、确认或排除隐患点,调查发现地面地质灾害变形点的变形迹象,证明灾害体发展态势。

当致灾体形变速率较大或已加速变形,对周边人员和财产造成严重威胁的地质灾害点应及时布设地面监测设备。地面监测设备布设需按照形变区域地质构造、地形地貌分布特征、变形特征在对应位置安装地面监测设备,全自动数据采集。地质灾害地面监测工作主要应用于地质灾害的稳定性评价、预测预报以及地质灾害防治效果的评估等方面,是规避突发性地质灾害监测的主要手段。

2 兰州普兰太公司滑坡早期识别应用

2.1 研究区概况和雷达数据

兰州市地处青藏高原和黄土高原的交汇处,北部毗邻白银市,东部和南部与定西市、临夏回族自治州相连;西南和西部与青海省接壤,西北部与武威市相邻。全市总面积 $1.31 \times 10^4 \text{ km}^2$,兰州主城区包括城关区、七里河区、安宁区和西固区,西起西柳沟,东至桑园峡,东西长约 40 km,南北宽约 1 ~ 7 km,呈“条带状展布”,面积约 220 km^2 。境内南部和西部基岩山地属温寒半湿润气候区,年平均气温 2 ~ 5 $^{\circ}\text{C}$,年降水量 400 ~ 600 mm;普兰太公司位于研究区监测范围的中北部,ALOS-2 雷达数据单景影像覆盖范围为 50 km $\times$ 70 km,研究区区域对原始影像进行了区域裁剪(图3)。

兰州普兰太公司滑坡处于兰州市皋兰县忠和镇忠和村,位于大砂沟左岸一级支沟沟岸,属黄土梁地貌。

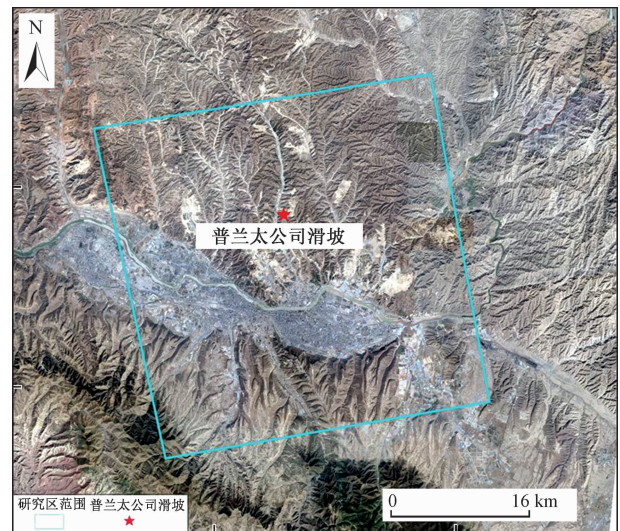


图3 研究区范围图

Fig.3 Scope of study area

距兰州市约 8 km,距皋兰县约 20 km,109 国道从斜坡体东侧通过,交通条件便利。收集覆盖实验区的 11 景升轨 L 波段 ALOS-2 雷达影像和 20 景 C 波段 Sentinel-1A 升轨数据,影像获取时间从 2019 年 9 月到 2020 年 4 月,具体参数如表 1、表 2 所示。

表1 ALOS-2 影像数据参数

Table 1 ALOS-2 Remote sensing image data parameters

数据	数据获取日期	入射角/($^{\circ}$)	升降轨	垂直基线/m
1	2019-09-01	42.907 0	升轨	0
2	2019-09-29	42.906 2	升轨	57.516 3
3	2019-10-13	42.907 0	升轨	-11.595 2
4	2019-10-27	42.906 2	升轨	-41.388 5
5	2019-12-08	42.906 1	升轨	17.593 8
6	2019-12-22	42.908 6	升轨	106.553 7
7	2020-01-19	42.906 4	升轨	58.180 2
8	2020-02-16	42.907 9	升轨	-113.413 8
9	2020-03-01	42.907 6	升轨	-92.080 6
10	2020-03-29	42.906 8	升轨	-43.469 8
11	2020-04-12	42.904 8	升轨	-111.184 6

2.2 InSAR 数据处理

利用 GAMMA 软件对雷达数据进行处理,使用 SRTM 30 m 分辨率 DEM 辅助数据去除地形相位的影响,使用 POD 精密轨道星历数据提高 Sentinel-1A 数据配准精度。对获取的雷达数据进行空间及时间基线阈值选取,确定符合条件干涉对和基线集,均采用 2019 年 9 月 1 日获取的影像为主影像进行配准(精度达到 1/8 个像元)与干涉,从其余各数据以此景影像为参照得到的垂直基线数据可以看出,最长基线与最短的基线分别为 220 m、2.2m,依据短基线集原理,对空间和

表 2 Sentinel 影像数据参数

Table 2 Sentinel remote sensing image data parameters

数据	数据获取日期	入射角/(°)	升降轨	垂直基线/m
1	2019-09-01	36.618 4	升轨	0
2	2019-09-13	36.618 4	升轨	0.095 4
3	2019-09-25	36.626 2	升轨	-115.530 2
4	2019-10-07	36.626 5	升轨	-120.110 3
5	2019-10-19	36.621 8	升轨	-50.410 3
6	2019-10-31	36.619 6	升轨	-18.229 6
7	2019-11-12	36.619 7	升轨	-18.787 7
8	2019-11-24	36.616 9	升轨	22.056 0
9	2019-12-06	36.619 8	升轨	-21.391 5
10	2019-12-18	36.622 4	升轨	-59.555 2
11	2019-12-30	36.620 7	升轨	-34.653 3
12	2020-01-11	36.617 2	升轨	17.544 2
13	2020-01-23	36.617 8	升轨	8.256 8
14	2020-02-04	36.618 9	升轨	-8.510 7
15	2020-02-16	36.622 4	升轨	-59.748 5
16	2020-02-28	36.619 2	升轨	-11.879 1
17	2020-03-11	36.622 8	升轨	-64.341 0
18	2020-03-23	36.621 4	升轨	-44.414 3
19	2020-04-04	36.621 8	升轨	-50.218 5
20	2020-04-16	36.624 9	升轨	-96.218 0

时间进行条件约束得到差分干涉对,最终得到 ALOS-2 有 27 组干涉对和 Sentinel-1A 有 52 组干涉对(图 4)。在得到干涉数据集之后,对空间域和时间域进行滤波处理,采用时空滤波的方法去除大气相位,将多景解缠后的多视差分干涉图建立模型方程组,通过奇异值分解(SVD)的方法最终得到视线方向(LOS)平均形变速率图和累计形变图。

2.3 结果分析

经过 SBAS-InSAR 处理,获取了研究区沿雷达视

线方向(LOS)的地面形变速率场信息(图 5),负值表示地面沉降,正值表示地面抬升。对研究区域进行“空-天-地”一体化早期识别技术时序分析,兰州地区 2019 年 9 月至 2020 年 4 月平均形变速率介于 $-219 \sim 138$ mm/a 之间,最大沉降形变速率场为保利-领秀山、青白石等平山造地区域,最大抬升形变速率场为施工填方区域。参照《地质灾害 InSAR 监测技术指南(试行)》和《滑坡崩塌泥石流灾害调查规范(1:50 000)》标准,对 InSAR 时序处理结果区域变形与外围存在明显的变形量值差,且具有较为固定形状的高速率变形图斑进行圈定解译,之后进行人工地面调查核查来确定新增隐患点。兰州普兰太公司滑坡最大沉降速率为 43.6 mm/a,区域平均沉降速率为 13.4 mm/a;和平万泉生态公墓填方边坡最大沉降速率为 121.4 mm/a,区域平均沉降速率为 26.6 mm/a,结合区域和形状特征圈定疑似地质灾害点,人工地面调查核查后确定兰州普兰太公司滑坡、和平万泉生态公墓填方边坡为新发现隐患点。

兰州普兰太公司滑坡 2019 年 9 月至 2020 年 4 月平均形变速率介于 $-43.7 \sim 15$ mm/a 之间,时间序列形变曲线显示形变主要集中在年初 2—4 月份(图 6、图 7)。

早期识别以后,调查组第一时间对兰州普兰太滑坡进行地面调查核查和空域无人机测绘,调查显示斜坡体岩性为黄土,结构较为疏松,垂直节理裂隙发育,具强湿陷性,属易滑土体,遇水后强度显著降低,易造成斜坡变形;斜坡所处山体坡高在 85~100 m 之间,坡度在 $30^\circ \sim 35^\circ$ 之间,临空条件较好,加之坡体前缘近

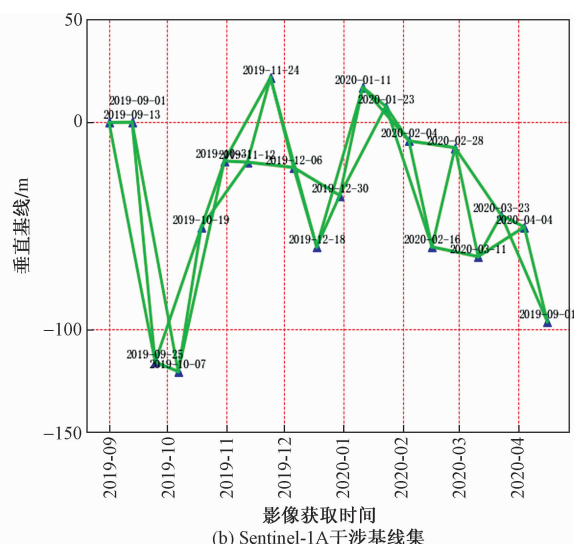
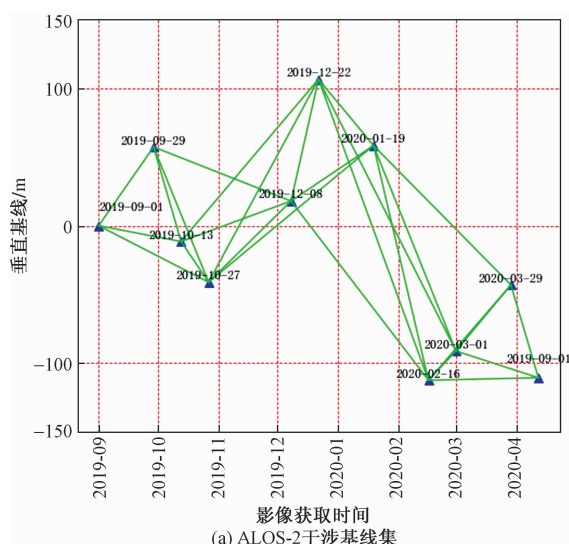


图 4 ALOS-2 与 Sentinel-1A 干涉基线集

Fig. 4 ALOS-2 and Sentinel-1A interference baseline sets

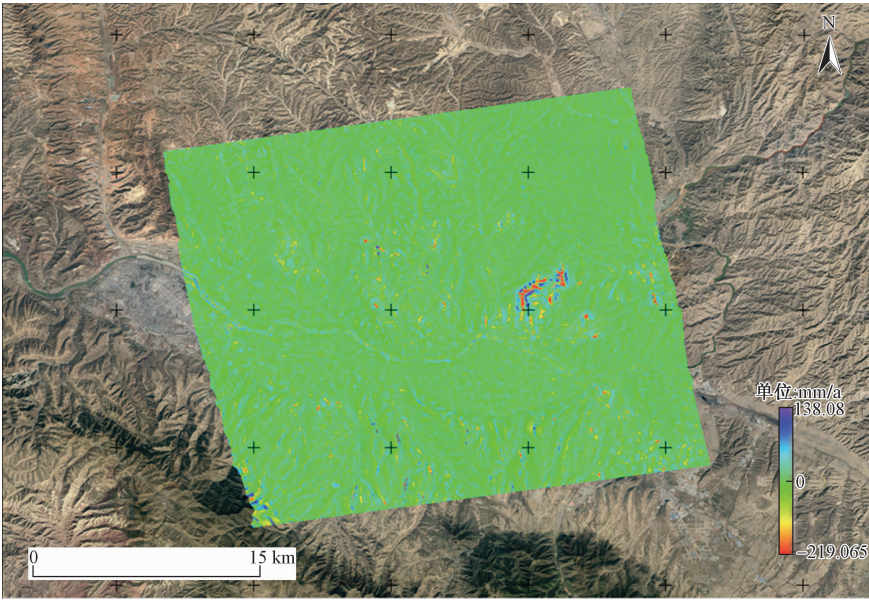


图 5 研究区形变速率图

Fig. 5 Deformation rate diagram in the study area

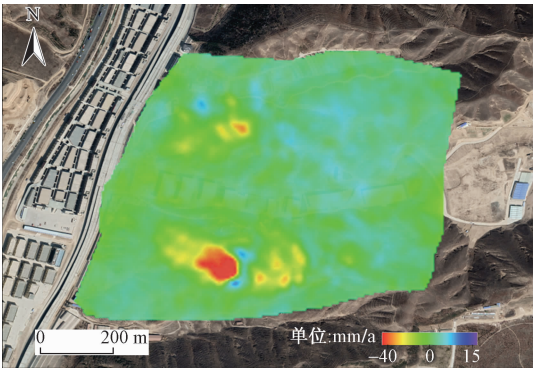


图 6 普兰太公司滑坡形变速率图

Fig. 6 Landslide deformation rate diagram of Pulantai Company

坡脚段人为开挖坡脚现象普遍,致使坡体前缘失去支撑,为斜坡失稳变形提供了有利的地形条件;兰州普兰太滑坡直接威胁人员 163 人,资产 4 800 万元,险情等级核定为大型。软弱的岩土体结构、良好的临空条件为斜坡变形奠定了基础,加之绿化灌溉水的入渗、春季的冻融和坡脚人为切坡导致斜坡体产生一定变形。

兰州普兰太公司滑坡时间序列累计沉降量图显示(图 8),从 2020 年 2—4 月累计变化量最为显著,根据实地调查,普兰太公司滑坡所在区域属南北两山绿化带,区内常年人工喷灌林地,每年 3—4 月冻融期,受冻融影响,坡体地表水的入渗致使黄土含水量增大,局部软化和饱和,增大斜坡体自重的同时,降低土体抗剪强度,减少了坡体的支撑力,导致裂缝发育,影响斜坡的

稳定性。该区域裂缝明显,与 L 波段早期识别数据有较好的一致性。

对该滑坡区域进行无人机数据采集,生成 DOM 影像,利用高清影像分析滑坡的形态特征,结合实地调查裂缝集中区域,得出滑坡后壁与堆积体部位。实地调查形变区与形变速率图变形范围相吻合(图 6、图 7)。根据该区域综合防治方案,对该区域进行监测设备部署(图 7),分析监测数据达到地面监测预警的目的。



图 7 普兰太公司滑坡应急监测平面布置图

Fig. 7 Emergency landslide monitoring plan of Pulantai Company

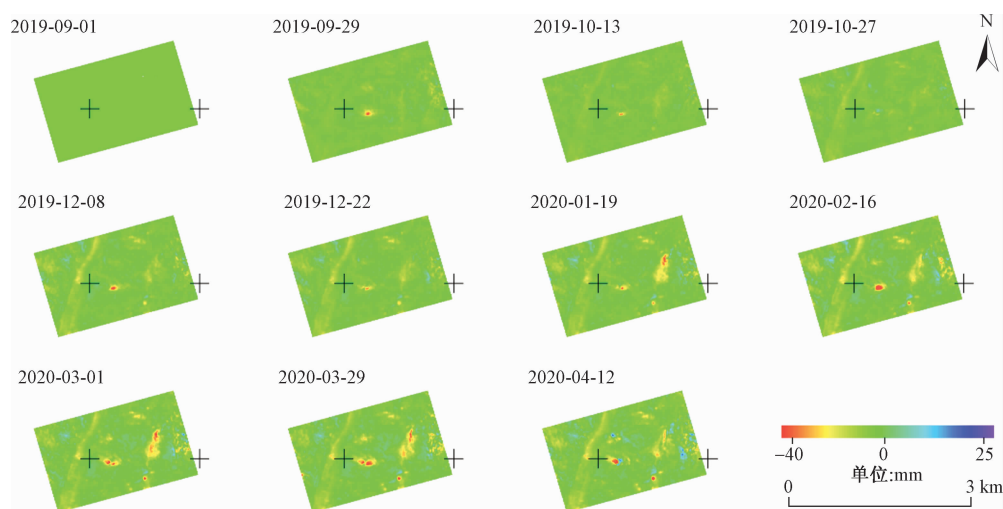


图8 时间序列累计沉降量

Fig.8 Cumulative settlement of time series

分别用不同波长的雷达数据对普兰太公司滑坡进行时序分析, Sentinel-1A 数据 C 波段波长约为 5.6 cm, ALOS-2 数据 L 波段波长约为 23.5 cm, 由于 L 波段穿透性更强, 使得 L 波段数据较 C 波段即使在相干性较低的区域也能获得更多的监测信息, 相干性更高, 处理结果显示 C 波段 Sentinel1A 数据在研究区域变形较小(图 9), 而 L 波段 ALOS-2 数据在该区域有较好的相干性, 三维沉降漏斗区域显示普兰太公司滑坡区域 11 期数据累计沉降量大于 -40 mm(图 10)。综合来看, L 波段雷达数据能够提取丰富的形变信息, 更适用于兰州典型滑坡地貌。

由于早期识别效果显著, “空-天-地”一体化地质灾害监测体系技术应用得当, 及时作出了防治措施, 兰

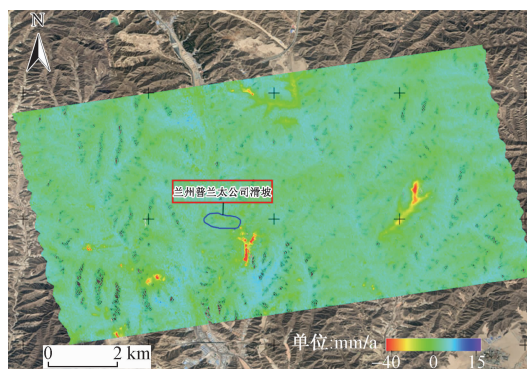


图9 Sentinel-1A 形变速率图

Fig.9 Sentinel-1A deformation rate diagram

州普兰太公司滑坡并未造成人员伤亡。

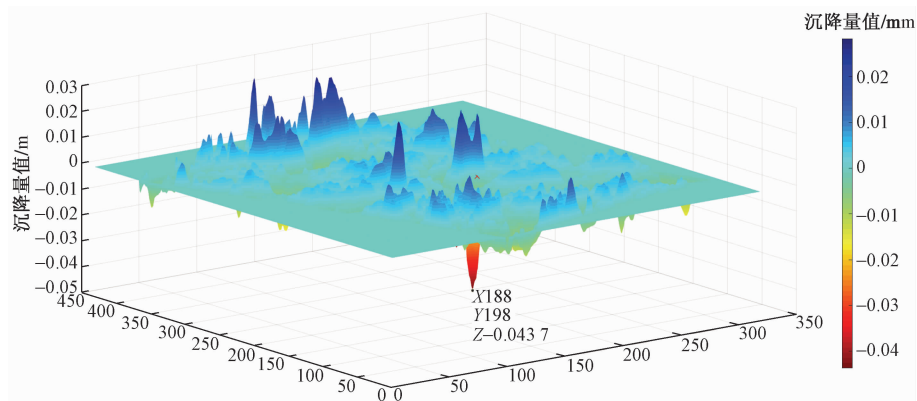


图10 普兰太滑坡三维沉降漏斗

Fig.10 Three-dimensional sedimentation funnel of Pulantai Landslide

3 结束语

本文采用 SBAS-InSAR“空-天-地”一体化早期识

别技术对兰州地区进行了地质灾害隐患广域早期识别探测, 得到了很好的应用效果, 成功识别出未在库且威胁较大的隐患点, 结合“空-地”手段为地质灾害防灾

减灾提供了科学依据,切实保障了人民群众生命财产安全。通过“空-天-地”一体化早期识别技术在兰州市典型滑坡早期识别中的应用,得出以下结论:

(1)通过对 L 波段雷达遥感数据时序分析处理,得出兰州地区 2019 年 9 月至 2020 年 4 月平均形变速率介于 $-219 \sim 138$ mm/a 之间,圈定解译形变区,成功识别 2 处未在库隐患区域,其中兰州市普兰太公司滑坡隐患对厂区工作人员的生命财产安全构成了巨大威胁。

(2)通过应用实践,利用短基线集 (SBAS-InSAR) 干涉测量技术对大范围长时间序列广域地质灾害早期识别可行且有效,能够为调查人员提供区域变形情况,提高传统地质灾害调查效率,从而为防灾减灾提供重要的数据支撑,同时可以根据变形特征规律追溯变形区域历史活动。

(3)通过实地调查核查论证 L 波段雷达数据时序分析早期识别结果,兰州市普兰太有限公司滑坡体宏观变形迹象明显,与 L 波段的 SBAS-InSAR 时序分析具有较高的一致性。C 波段 Sentinel-1A ($5 \text{ m} \times 20 \text{ m}$) 数据在兰州黄土边坡植被覆盖区域相干性程度较低或出现失相干的情况,而 L 波段 ALOS-2 数据 (3 m) 相干性程度较高,时序分析表明雷达数据在相干性程度较高的区域探测形变特征更为明显。L 波段雷达遥感数据时序分析在兰州典型滑坡地质灾害早期识别中效果显著,可以在区域滑坡早期识别中推广应用。

(4)兰州地区地质灾害“空-天-地”一体化早期识别是新技术、新方法在黄土地区典型地质灾害领域的探索应用,该应用为省级地质灾害早期识别与区域监测积累了宝贵的经验,有助于进一步提高我省地质灾害监测水平与预防能力。

参考文献:

- [1] 孙萍萍,张茂省,程秀娟,等. 黄土高原地质灾害发生规律[J]. 山地学报, 2019, 37(5): 737 - 746. [SUN P P, ZHANG M S, CHENG X J, et al. On the regularity of geological hazards on the loess plateau in China[J]. Mountain Research, 2019, 37(5): 737 - 746. (in Chinese)]
- [2] 冯乐涛,宿星,吴玮江,等. 兰州市地质灾害分布规律及预警评价研究[J]. 甘肃科学学报, 2014, 26(5): 63 - 67. [FENG L T, SU X, WU W J, et al. Distribution regularity and early warning evaluation of geological hazards in Lanzhou[J]. Journal of Gansu Sciences, 2014, 26(5): 63 - 67. (in Chinese)]
- [3] 庄飞舟. 兰州市地质灾害特征与防灾减灾对策[J]. 甘肃科技纵横, 2007, 36(3): 32 - 33. [ZHUANG F Z. Characteristics of geological disasters in Lanzhou and countermeasures for disaster prevention and mitigation[J]. Scientific & Technical Information of Gansu, 2007, 36(3): 32 - 33. (in Chinese)]
- [4] 郭富赞. 兰州市地质灾害特征与风险管控对策[J]. 城市与减灾, 2019(3): 59 - 63. [GUO F Y. Characteristics of geological disasters and risk control strategies in Lanzhou City[J]. City and Disaster Reduction, 2019(3): 59 - 63. (in Chinese)]
- [5] 吴玮江,李炳龙. 兰州市滑坡泥石流灾害与防治[J]. 西安地质学院学报, 1996(3): 43 - 50. [WU W J, LI B L. The hazard and control of landslide and debris flow in Lanzhou City[J]. Journal of Xi'an University of Engineering, 1996, 18(3): 43 - 50. (in Chinese)]
- [6] 畅俊杰. 兰州市区滑坡泥石流危害、成因及其防治对策[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 250 - 252. [CHANG J J. Formative causes of landslide and debris flow in Lanzhou City and preventives[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(4): 250 - 252. (in Chinese)]
- [7] 李永进,冯学才. 兰州市地质灾害特征与防灾战略[J]. 甘肃科学学报, 2003, 15(增刊1): 30 - 33. [LI Y J, FENG X C. The characteristics of geological hazards and developing prevention strategy in Lanzhou urbanization[J]. Journal of Gansu Sciences, 2003, 15(Sup1): 30 - 33. (in Chinese)]
- [8] 王志荣,李永进,冯学才. 兰州市地质灾害防治与开发利用[J]. 甘肃科学学报, 2000, 12(1): 91 - 93. [WANG Z R, LI Y J, FENG X C. Geological hazard control and land-using and developing of Lanzhou City[J]. Journal of Gansu Sciences, 2000, 12(1): 91 - 93. (in Chinese)]
- [9] 张国安,陈耿琦,胡坚,等. InSAR 在地震研究中的应用[J]. 华南地震, 2003, 23(1): 68 - 73. [ZHANG G A, CHEN G Q, HU J, et al. Application of synthetic aperture radar interferometry (InSAR) in the research of seismology[J]. South China Journal of Seismology, 2003, 23(1): 68 - 73. (in Chinese)]
- [10] 云烨,吕孝雷,付希凯,等. 星载 InSAR 技术在地质灾害监测领域的应用[J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 73 - 85. [YUN Y, LYU X L, FU X K, et al. Application of spaceborne interferometric synthetic aperture radar to geohazard monitoring[J]. Journal of Radars, 2020, 9(1): 73 - 85. (in Chinese)]

- [11] 焦明连, 蒋廷臣. 基于 InSAR 技术矿区地表形变的监测[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2008, 17(2): 70 – 73. [JIAO M L, JIANG T C. Monitoring the deformation of mining areas based on InSAR[J]. Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Science Edition), 2008, 17(2): 70 – 73. (in Chinese)]
- [12] 梁伟锋, 王庆良. InSAR 技术在火山监测研究中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2003(4): 122 – 126. [LIANG W F, WANG Q L. Application of InSAR technology in volcanic monitoring research[J]. JMT and Geodynamics, 2003(4): 122 – 126. (in Chinese)]
- [13] 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): 2202 – 2212.
- [14] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8 – 20.
- [15] 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.
- [16] 孙晓鹏, 鲁小丫, 学虎, 等. 基于 SBAS-InSAR 的成都平原地面沉降监测[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(3): 123 – 129. [SUN X P, LU X Y, XUE H, et al. Monitoring of ground subsidence in Chengdu Plain using SBAS-InSAR [J]. Remote Sensing of Land resources, 2016, 28(3): 123 – 129. (in Chinese)]
- [17] 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. [XU Q, DONG X J, LI W L. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957 – 966. (in Chinese)]
- [18] 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 L, LIAO M S, DONG J, 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)]
- [19] 方达里. InSAR 技术在安县地区地表形变监测中的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014. [FANG D L. Application of InSAR technology in surface deformation monitoring in Anxi County[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese)]
- [20] 杨亚彬, 李慧. 基于 Sentinel-1A 雷达影像的 SBAS 技术在地表形变中的应用[J]. 测绘工程, 2018, 27(8): 42 – 48. [YANG Y B, LI H. Application of SBAS technology to the surface deformation based on Sentinel-1A radar image[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2018, 27(8): 42 – 48. (in Chinese)]
- [21] 张静, 张勤, 曲菲霏. 运城市地面沉降 SBAS-InSAR 监测和敏感性 GIS 分析[J]. 上海国土资源, 2012, 33(1): 58 – 61. [ZHANG J, ZHANG Q, QU F F. Monitoring land subsidence using SBAS-InSAR and GIS to conduct sensitivity analysis in Yuncheng[J]. Shanghai Land & Resource, 2012, 33(1): 58 – 61. (in Chinese)]
- [22] 罗钺. 基于 SBAS-InSAR 的西安地表沉降监测[D]. 西安: 长安大学, 2012. [LUO C. Monitoring of surface subsidence in Xi'an based on SBAS-InSAR[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)]
- [23] 梁涛. 利用短基线集 InSAR 技术监测矿区地表形变[J]. 测绘通报, 2014(增刊2): 82 – 84. [LIANG T. Monitoring surface deformation in mining area by using short baseline set InSAR technology [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014 (Sup2): 82 – 84. (in Chinese)]
- [24] 吴振宇, 马彦山. 无人机遥感技术在地质灾害调查中的应用[J]. 宁夏工程技术, 2012, 11(2): 133 – 136. [WU Z Y, MA Y S. Application of remote sensing technology of UAV in the investigation of the geological disaster [J]. Ningxia Engineering Technology, 2012, 11(2): 133 – 136. (in Chinese)]
- [25] 包广兴. 关于崩塌、滑坡地质灾害监测现状的探讨[J]. 世界有色金属, 2019(10): 208 – 210. [BAO G X. Discussion on the current situation of monitoring the geological disasters of collapse and landslide[J]. World Nonferrous Metals, 2019(10): 208 – 210. (in Chinese)]