

文章编号: 1001-1749(2023)06-0812-12

基于 SBAS-InSAR 的西宁市滑坡识别和形变监测分析

何丽^{1,2a}, 吴先谭^{1,2b}, 陈欣^{2b}, 罗芳^{2b}, 何政伟^{1,2b},
薛东剑^{1,2b}, 白文倩^{2b}, 康桂川^{2b}, 张雨祥^{2b}

(1. 青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 西宁 810000;

2. 成都理工大学 a. 地理与规划学院,

b. 成都理工大学 地球科学学院, 成都 610059)

摘要: 中国黄土高原滑坡灾害频发, 严重威胁经济的发展及生命财产安全。利用时序合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术识别潜在的活动滑坡, 并对其形变监测, 有利于预防和减轻灾害造成的危害。InSAR技术具有大范围观测地表变形的能力, 这里以西宁市为研究区, 采用83景升轨和87景降轨 Sentinel-1A 雷达影像, 利用小基线集(SBAS)时间序列 InSAR 技术, 获取了研究区2019年1月至2021年11月地表形变速率以及时序形变量, 共探测到74处显著形变区; 结合地貌和光学影像特征, 确定其中35处为活动黄土滑坡。通过对活动滑坡的时间序列形变分析, 内在(工程岩组、断层)和外(降雨)条件的共同作用, 是激活不稳定边坡或加速边坡运动的主要因素。

关键词: 黄土滑坡; 滑坡识别; 形变监测; 时间序列 InSAR; 西宁市

中图分类号: P 237; P 642.22 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-1749.2023.06.14

0 引言

中国黄土高原的面积约 $6.4 \times 10^5 \text{ km}^2$, 黄土厚度约为 $100 \text{ m} \sim 300 \text{ m}$ ^[1]。黄土具有孔隙大、质地疏松、垂直节理发育等独特的构造特征, 在降雨的条件下极易发生滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害^[2]。黄土滑坡是黄土高原分布最广的一类地质灾害^[3]。近年来, 由于黄土地区日益脆弱的地质环境, 在强降雨条件下黄土斜坡极易发生倾倒、滑移, 对人类生命财产安全威胁极大^[4]。2010年榆林市发生大规模黄土崩塌, 造成了严重的人员伤亡和财产损失^[5] (如2013

年天水市受强降雨影响, 诱发大规模黄土滑坡^[6])。因此, 大范围高效、精准地识别与监测具有潜在危险性的蠕变型黄土滑坡, 对于滑坡防治、灾害预警以及保护人民生命财产安全具有重要意义。

随着遥感技术的发展, 光学遥感^[7]、无人机(UAV)摄影测量^[8]、机载激光雷达(LiDAR)^[9]和合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR^[10])等技术逐渐成为滑坡识别和形变监测的主要手段。其中 InSAR 技术因具备高精度、高分辨率、覆盖范围大、综合成本低、全天时和连续跟踪微小形变等技术优势, 使其在大范围滑坡识别和形变监测应用中得到青睐^[11-13]。1996

收稿日期: 2023-02-10

基金项目: 青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室资助项目(2019-KZ-02)

第一作者: 何丽(1991-), 女, 副研究员, 主要研究方向为地质灾害识别与防治, E-mail: heli2020@cut.edu.cn。

年 Fruneau^[14]首次证明了合成孔径雷达差分干涉测量技术(D-InSAR)在滑坡形变监测的有效性,同时也发现时空失相干和大气延迟对形变监测结果影响较大。随后,国际学者在 D-InSAR 技术的基础上提出了基于多景 SAR 影像数据的时间序列 InSAR 技术(TS-InSAR),包括永久散射体干涉测量(Persistent Scatterer InSAR, PS-InSAR)^[15]、小基线集干涉测量(Small Baseline InSAR, SBAS-InSAR)^[16]、分布式散射体干涉测量 SqueeSAR^[17]等技术,这些技术能够获取精度更高、可靠性更强的滑坡形变结果,在大面积滑坡识别和形变监测中已得到广泛应用。目前,以 SBAS 为代表的 TS-InSAR 已被用于黄土滑坡的识别和形变监测^[18-19]。如刘陈伟等^[20]利用 SBAS 技术获取黑方台地区地面形变速率,并结合黄土滑坡的地形地貌特征,识别出黑方台地区 6 块存在较大形变的区域;Meng 等^[21]利用无人机(UAV)摄影测量与 SBAS-InSAR 技术表征甘肃省红堡岷黄土滑坡形变过程,对比分析发现 SBAS-InSAR 技术在蠕变变形监测方面更具有优势。

笔者以升降轨 Sentinel-1A 雷达影像作为数据源,在对时序 InSAR 技术分析的基础上,采用 SBAS-InSAR 技术,提取了西宁市的分布式散射体(Distributed Scatterers, DS),反演了研究区的形变速率和时间序列形变量,并结合 Google Earth 遥感影像圈定了活动滑坡边界,分析了西宁市活动滑坡的分布规律,以及滑坡累计形变与降雨的关系。本研究结果为同类型区域黄土滑坡识别和形变监测提供了借鉴。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

西宁市位于青藏高原东北部,隶属于湟水中游河谷盆地,地理位置:101°33'E~101°56'E;36°25'N~36°47'N,区域面积为 490 km²。研究区地势西北高东南低,地形切割强烈,沟壑纵横,区内发育一条近东西向的湟水河(图 1)。研究区地层由老到新为长城系(Pta)、白垩系(K)、古近系(E)、新近系(N)、中更新统(Q2)、上更新统(Q3)、全新统(Q4)。岩土类型主要有黄土、泥岩砂岩和石膏岩互层、松散碎石土,均为易失稳变形地层。西宁市属高原半干旱大陆性气候,西宁地区全年降雨分配不均匀,年降雨量 477.5 mm,主要集中在 6 月-9

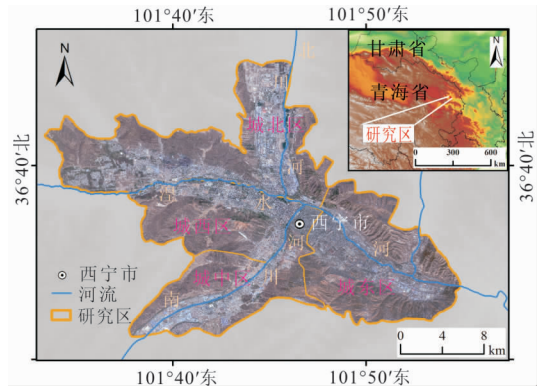


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the research area

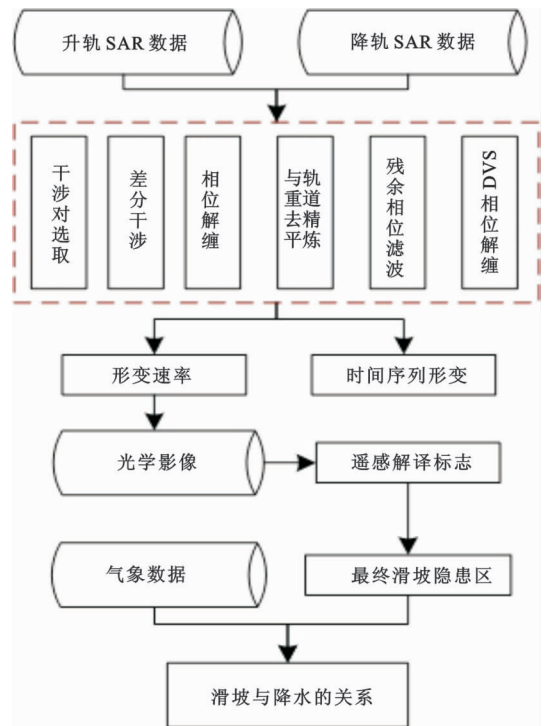


图 2 技术流程图

Fig. 2 Technical flow chart

月,占全年总降雨量的 67.4%,年降雨周期性变化明显。研究区地形主要以侵蚀构造低山丘陵与侵蚀堆积河谷平原为主,在低山丘陵前缘多发育高陡斜坡,加之区域降水集中,极易诱发滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害。

1.2 数据来源与数据处理

Sentinel-1A 是由欧洲航天局(ESA)发射的 C 波段合成孔径雷达对地观测卫星,该卫星具有全天时、多种极化方式、时空分辨率高等特征。本研究采用 Sentinel-1A 卫星以干涉宽幅(IW)模式下 VV 极化方式获取的单视复数产品(SLC)进行时间序列

表 1 Sentinel-1A 卫星基础数据
Tab.1 Basic data of Sentinel-1A satellite

传感器	Sentinel-1A(path128)	Sentinel-1A(path 33)
轨道方向	升轨	降轨
距离向×方位向分辨率	5×20	5×20
影像数量	83	87
获取时间	20190109—20211118	20190102—20211111

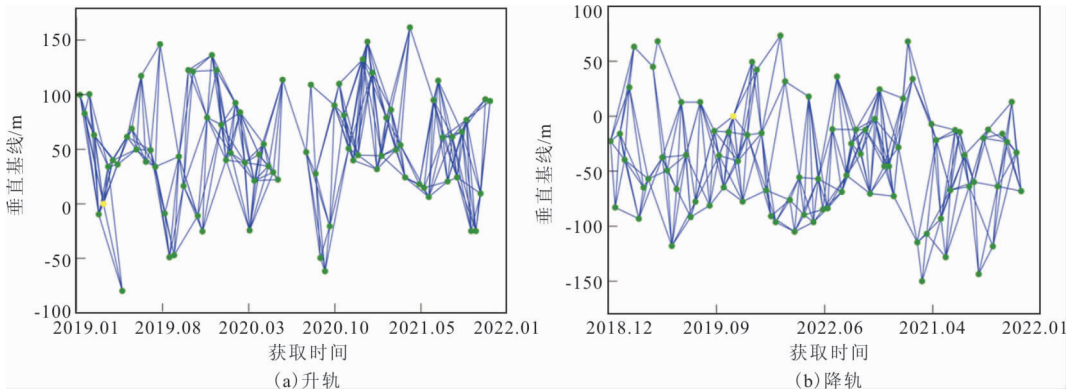


图 3 SBAS-InSAR 时空基线图
Fig. 3 SBAS-InSAR space-time baseline diagram

形变反演,影像采集了 2019 年 1 月至 2021 年 11 月 83 幅升轨影像和 87 幅降轨影像。升轨影像与降轨影像在不同的入射角下,存在不同程度的几何畸变,形成不同的观测效果。结合升轨与降轨数据进行滑坡识别,能更有效地扩大监测范围。SAR 数据的基本参数如表 1 所示,具体的技术流程如图 2 所示。

此外,笔者采用 30 m 分辨率的 SRTM(shuttle radar topography mission) DEM(digital elevation model)去除干涉过程中的地形相位。选用 POD Precise Orbit Ephemerides(POD 精密定轨星历数据)(<https://qc.sentinel1.eo.esa.int/>)校正轨道信息,选用 Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR(GACOS)(<http://www.gacos.net/>)大气延迟产品数据,该数据时间和空间分辨率较高,全球近实时,可有效去除干涉图中的大气延迟相位收集了西宁市气象站 2019 年—2021 年日平均降水量数据,用于分析滑坡形变与降雨量之间的关系。

2 实验方法

Berardino 等^[16]提出的 SBAS-InSAR 技术是

对分布式散射体(Distributed scatterer DS)进行相位分析获得时序形变。该技术对基于低分辨率、大尺度、时序形变监测能够取得很好的效果^[22]。与传统的 D-InSAR 技术相比较而言,SBAS-InSAR 技术能够较好地克服时空失相关和大气延迟效应等缺陷,实现更高精度的地表形变监测^[23]。SBAS-InSAR 技术实现过程为:

1)对原始的 Sentinel-1A 数据进行轨道信息校正以及裁剪到覆盖整个研究区范围。

2)综合考虑时间-空间基线,分别选取 2019 年 3 月 10 日和 2019 年 11 月 10 日的影像作为升轨和降轨数据的配准主影像。设置 60 d 时间基线,150 m 空间基线,分别筛选出 320 个和 304 个干涉对(图 3)。对干涉对进行多视、干涉图生成、去平地相位、Goldstein 滤波、最小费用流(MCF)相位解缠等处理获得每个干涉图中任意像元(x, y)的差分干涉解缠相位。

3)形变速率和累计形变估算,形变分量可以进一步分解为线性形变分量和非线性形变分量。通过相位与时间基线间的最小二乘拟合,可以估算出线性位移。使用奇异值分解法(SVD)求出非线性形变最小范数意义上的解。

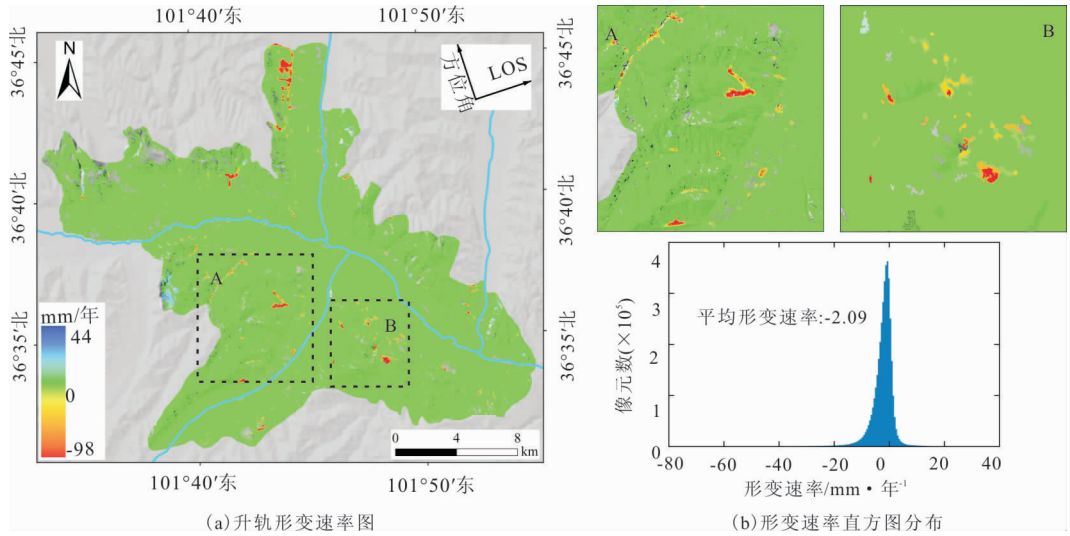


图 4 Sentinel-1A 升轨形变速率图

Fig. 4 Sentinel-1A rising rail variable speed diagram

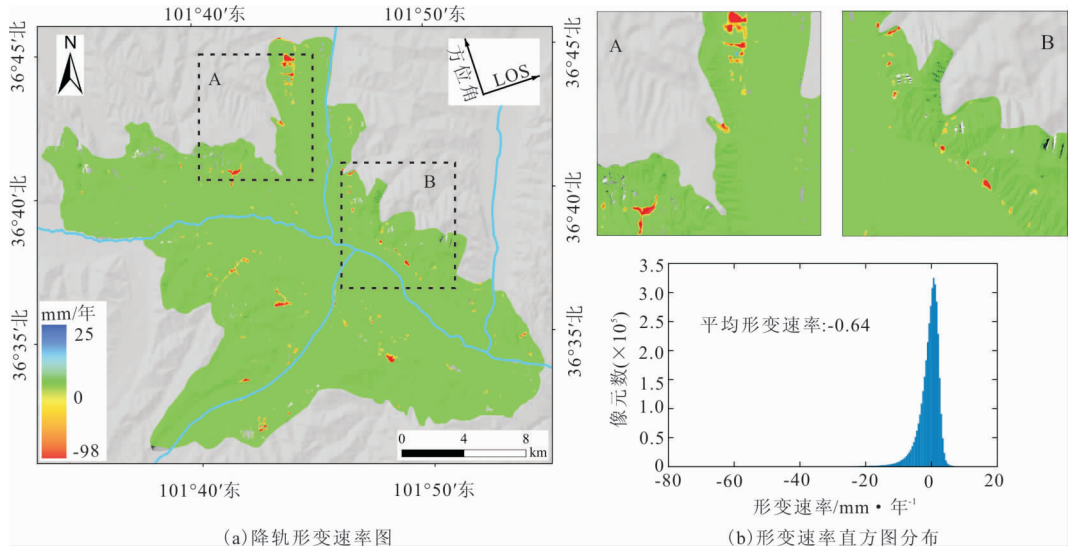


图 5 Sentinel-1A 降轨形变速率图

Fig. 5 Sentinel-1A descending rail variability chart

3 实验结果

3.1 SBAS-InSAR 识别活动滑坡

通过 SBAS-InSAR 技术获取西宁市 Sentinel-1A 升轨和降轨数据雷达视线 (Line of Sight, LOS) 方向上的形变速率 (图 4、图 5)。图 4、图 5 中红色的点 (负值) 表示目标沿着 LOS 方向远离卫星移动, 绿色的点表示在监测时间段内目标相对稳定, 蓝色点 (正值) 表示目标沿着 LOS 方向靠近卫星移动。研究区升轨形变速率位于 $-98 \text{ mm/年} \sim 44 \text{ mm/年}$ 之间 (图 4(a)), 降轨形变速率位于 -95

$\text{mm/年} \sim 25 \text{ mm/年}$ 之间 (图 5(a))。由图 4(b)、图 5(b) 可知, 升轨和降轨形变速率均主要集中在 $-10 \text{ mm/年} \sim 10 \text{ mm/年}$ 的范围内, 平均形变速率分别为 -2.09 mm/年 、 -0.64 mm/年 , 且分布特征与正态分布相似, 这表明研究区整体上处于稳定状态。基于形变速率信息, 笔者将形变速率超过 -15 mm/年 区域确定为显著形变区。研究区共探测到 74 处显著形变区 (升轨数据 53 处, 降轨数据 67 处, 升轨和降轨数据联合 46 处), 总面积约 9 km^2 。

为了进一步判断形变区是否为滑坡及圈定滑坡边界范围, 结合显著形变区的分布情况, 利用多期次 Google Earth 光学遥感影像和高分 2 号影像数据

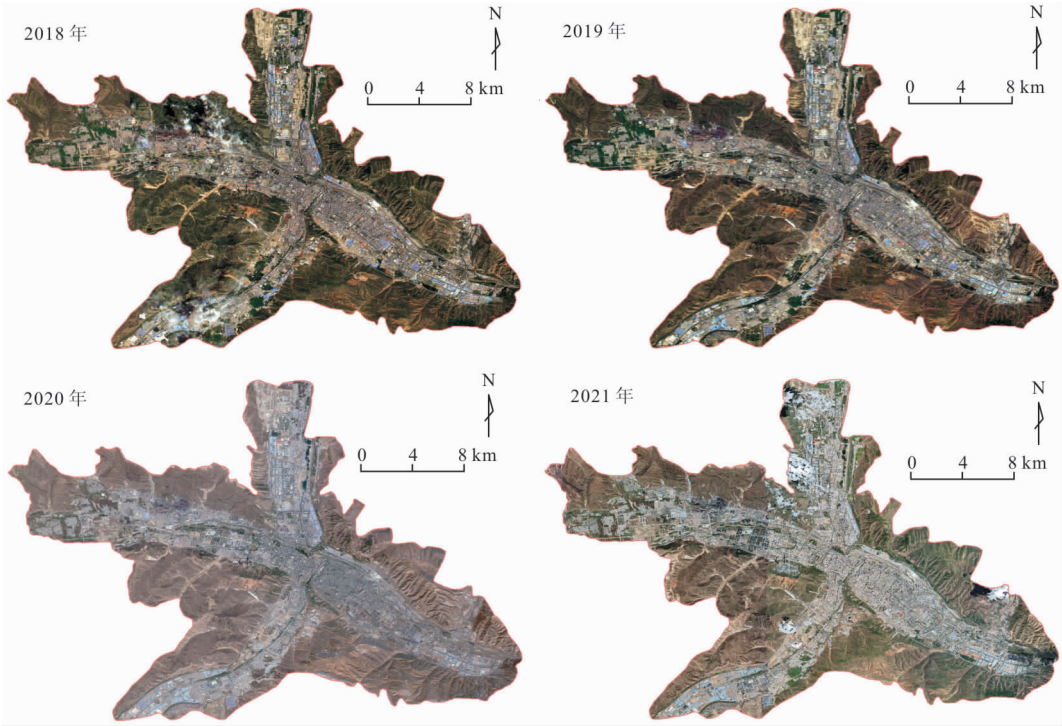


图 6 西宁市不同时期遥感影像图

Fig. 6 Remote sensing images of Xining city in different periods

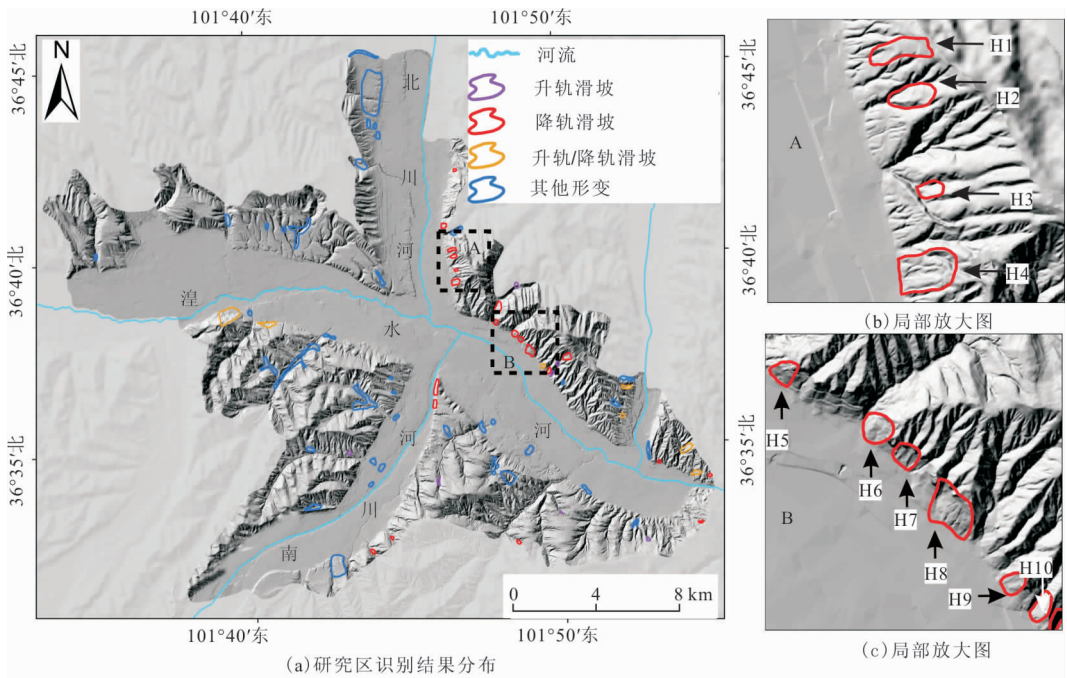


图 7 识别区结果分布及滑坡主要发育区局部放大图

Fig. 7 Localized enlarged map of the distribution of identification area results and the main development areas of landslides

(图 6),可以清晰地观察到地表物体形态。结合滑坡在光学遥感色调、纹理、平面形态、微地貌形态以及变形特征等解译标志,特别是在高分辨率影像中

表现出明显的裂缝及滑塌现象,对 SBAS-InSAR 技术探测到的显著形变区进一步划分,最终划定了升轨滑坡、降轨滑坡以及其他形变区的分布范围(图

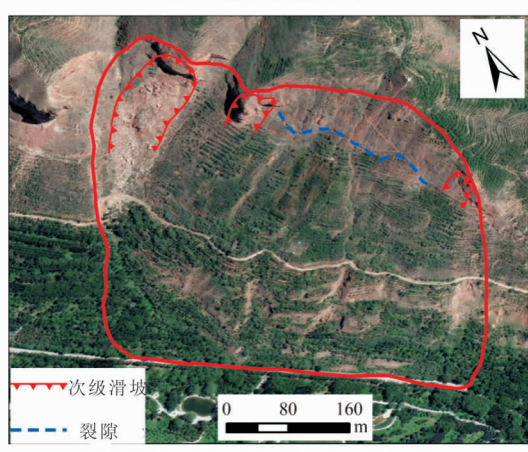
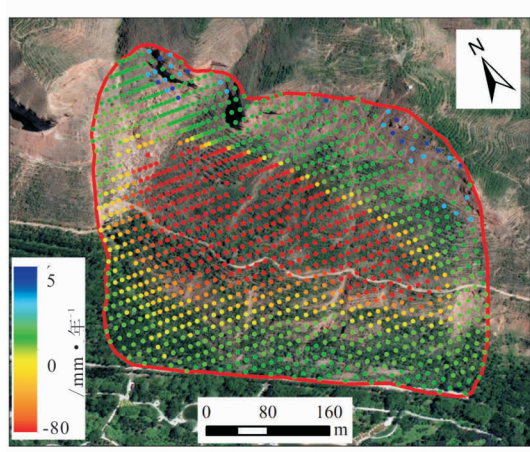
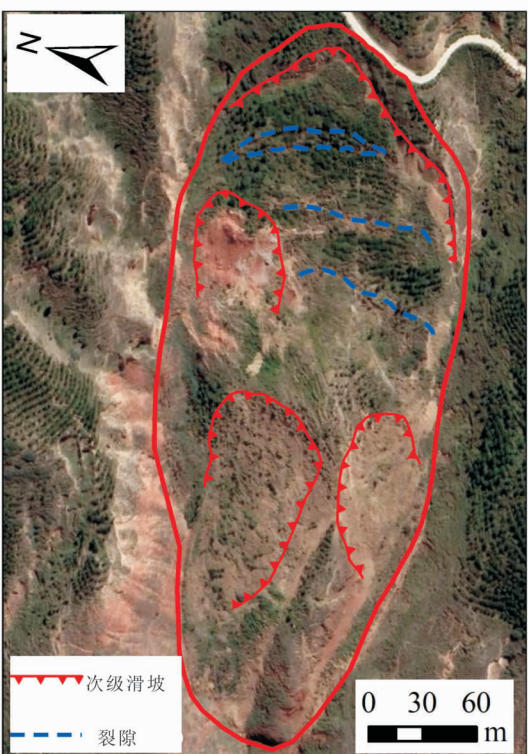
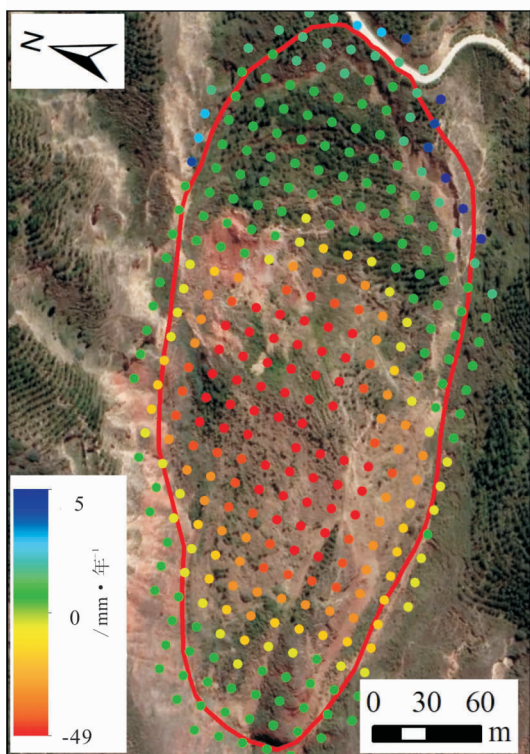
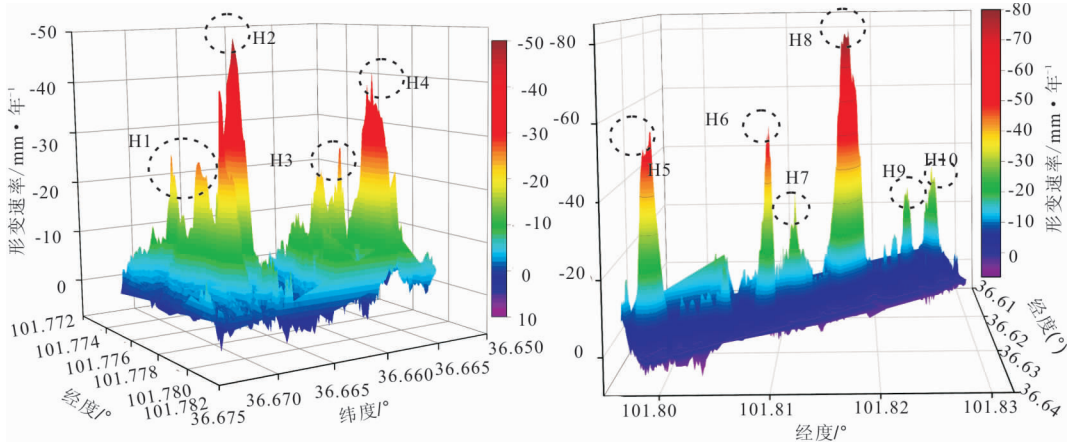


图 8 研究区典型滑坡形变速率及空间分布

Fig. 8 Typical landslide deformation rate and spatial distribution in the research area

7)。笔者将 35 处具有明显滑坡光学影像解译特征的显著形变区识别为滑坡,并在 Google Earth 影像中勾画出滑坡边界,39 处具有明显人类活动特征的显著形变区识别为其他形变区(图 7(a))。

经过分析,InSAR 技术识别的 35 处滑坡中,升轨数据识别出 14 处、降轨数据识别出 28 处、升轨和降轨数据联合识别出 7 处(图 7(a))。识别出的滑坡总面积约 2.4 km²,其中面积最小为 5 945.64 m²,最大为 0.56 km²,规模以中大型为主。滑坡呈条带状集中分布于湟水河及其一级支流河谷平原区向低山丘陵区过渡的斜坡地带,且湟水河北岸滑坡发育密度大于南岸。图 7(b)、图 7(c)为研究区滑坡典型发育区,分别记为 A 区和 B 区。

图 8(a)、图 8(b)分别表示 A 和 B 典型区 InSAR 降轨数据形变速率空间三维分布,分析可知,A 区和 B 区域分别发育 4 处滑坡(H1、H2、H3、H4)

和 6 处滑坡(H5、H6、H7、H8、H9、H10),其基本特征如表 2 所示。

由表 2 及图 8(c)、图 8(d)可知,A 区域中 H2 滑坡最大形变速率达 48.87 mm/年,坡体形变集中在中部和前缘,在滑坡体前缘和中部发育 3 处次级滑坡。后缘下错约 10 m 并且发育多条走向近南北裂缝,长约 180 m。中部有一系列横向延伸长度 70 m~90 m 的不连续圆弧形拉裂缝,且呈逐步贯通趋势,在自重作用下,上部岩土不断向下挤压。由表 2 及图 8(e)、图 8(f)可知,B 区域中 H8 滑坡最大形变速率达 81.26 mm/年,坡体形变集中在中部区域,滑体后部发育有三条裂缝,均呈东西向展布,平面形状呈弧形,最长一条达到 170 m,宽 0.2 m~0.6 m,滑坡体北侧分布呈带状陡崖,坡度近 90°。现陡崖上发育多处危岩,危岩与母岩间裂隙宽 10 cm~30 cm,上下贯通,呈孤立状(图 8(d))。

表 2 重点区 InSAR 识别滑坡的基本特征

Tab. 2 Basic characteristics of landslides identified by InSAR in key areas

滑坡编号	经度/°	纬度/°	长/m	宽/m	坡度/°	坡向/°	面积/m ²	最大形变速率/mm·年 ⁻¹
H1	101°46'36"	36°40'11"	400	120	27	259	50 837	-39.74
H2	101°46'39"	36°39'60"	330	160	32	268	41 234	-48.87
H3	101°46'43"	36°39'38"	180	110	36	281	16 095	-23.88
H4	101°46'42"	36°39'20"	390	270	30	256	98 434	-42.05
H5	101°47'57"	36°38'15"	245	220	31	227	45 309	-56.84
H6	101°48'33"	36°37'56"	310	300	30	251	73 202	-55.79
H7	101°48'45"	36°37'47"	230	250	36	218	49 595	-35.66
H8	101°49'2"	36°37'29"	340	480	29	225	160 007	-81.26
H9	101°49'26"	36°37'4"	250	190	32	245	40 237	-29.70
H10	101°49'37"	36°36'56"	305	170	33	264	40 159	-35.18

识别到的 39 处其他形变区在影像可清晰识别为挖填区(治沟造地、土地整平、垃圾填埋、流域治理)、建筑施工区、道路沉降区、矿业和工业区等。经过现场调查核实,最终确定 13 处为挖填区、16 处为建筑施工区、2 处为道路沉降区、4 处为矿业和 4 处为工业区。图 9(a)~图 9(c)分别显示了建筑施工、工业区和治沟造地引起的地表形变。

4 讨论

4.1 滑坡时间序列形变与降雨关系

降雨是诱发黄土滑坡的重要因素之一,这与黄

土孔隙比、湿陷性等独特性质密切相关。本研究以张家湾滑坡和付家寨滑坡为例,分析降雨与滑坡时间序列累计形变(SBAS-InSAR)的演化关系。

4.1.1 张家湾滑坡形变与降雨关系

该滑坡地理坐标为 101°39'04"E,36°38'25"N。滑坡高差约 325 m,坡度 30°,面积 5.6×10^6 m²,总体积 2.2×10^6 m³,表层披覆黄土,属平缓层状岩质斜坡,为特大型推移式滑坡。滑坡呈不规则状,坡体有多处浅表层滑塌迹象,后缘裂缝明显(图 10(a))。图 10(b)为该滑坡 Sentinel-1A 升轨影像 LOS 方向形变速率图,形变速率范围为 -25 mm/年~10 mm/年,形变部位集中在滑坡后缘及中部具有明显

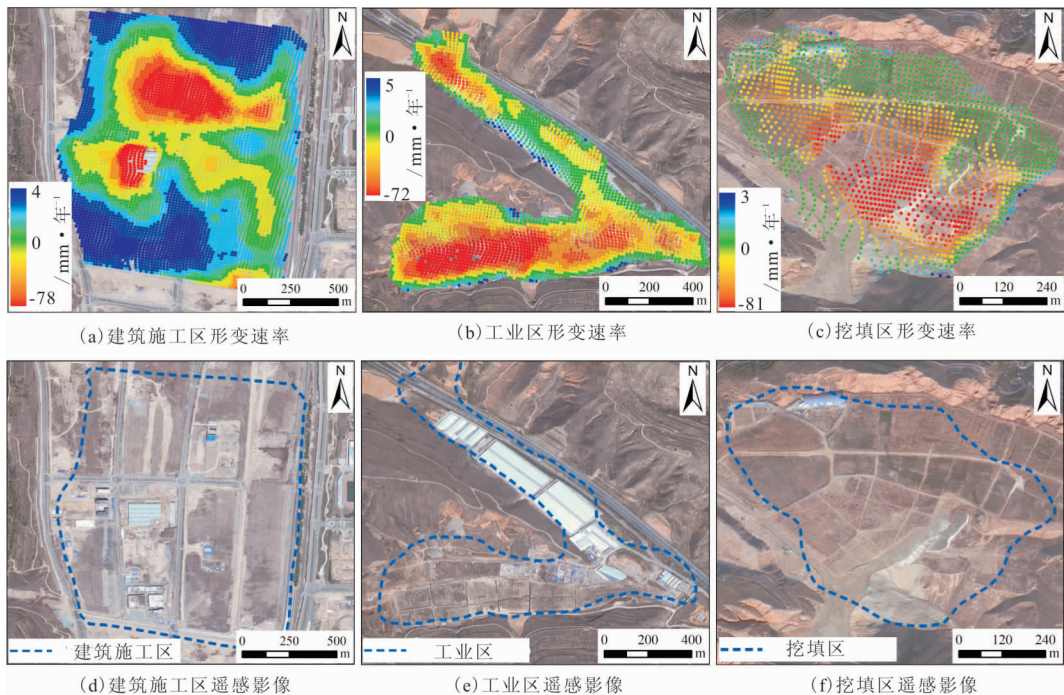


图 9 研究区其他变形区展示图

Fig. 9 Other deformation zones in the study area

拉裂缝的区域。根据形变点分布规律,可将滑坡分为四个显著性形变区(I、II、III、IV)。经野外调查可得,滑坡 I 区后缘贯通,有土质垮塌的现象,前缘的挡墙有开裂(图 10(c))。II 区因人类工程活动导致部分地带有失稳的可能。III 区发育走向 130° 的张性拉裂缝,下错明显约 80 cm,形成新的不稳定体,目前该区已进行了滑坡治理。IV 区后缘可见局部的垮塌,且发育多条裂缝(图 10(d))。滑坡体上季节性降雨导致裂缝、落水洞、座落等现象时有发生。分别在四个区域取一点(P1、P2、P3、P4)进行时间序列累计形变量与日平均降雨量关系分析(图 10(e)),四个区域的累计形变量均呈现波动增加,其中 P1 点累计形变量最大为 -78.6 mm,形变曲线反映该区域处于快速形变阶段。滑坡在 2019 年 6 月—2020 年 2 月和 2020 年 8 月—2021 年 2 月(浅蓝色区域),由于雨季和冻融沉降的到来,形变量呈快速增加趋势,可见滑坡形变与日平均降雨量密切相关,具有明显的季节性特征,尤其是在雨季变形明显加速,并且变形加速时间与雨季开始时间存在明显的滞后效应。

4.1.2 付家寨滑坡形变与降雨关系

该滑坡于 2019 年 11 月 18 日发生在城东区付家寨北部,地理坐标: E: $101^\circ 54' 10.54''$ 、N: $36^\circ 34' 52.03''$ 。滑坡长 270 m,横 310 m,滑向 295° ,平均坡

度 25° ,平面形状近似正方形,滑坡体较为破碎,发育多个次级滑坡,多条裂缝贯穿,后缘下错明显(图 11(a)~图 11(b))。

图 11(c)为该滑坡 Sentinel-1A 降轨影像 LOS 方向形变速率图,坡体形变集中在中前部区域,最大形变速率达 40 mm/年,结合地形条件和形变空间分布特征可将滑坡分为两处显著形变区(I、II)。在两处形变显著区域各选 1 个特征点 P1、P2,其中 P1 平均形变速率为 31 mm/年,累计形变量为 92.7 mm。该形变区前缘堆积体堆覆沟道内,挤压沟道,堆积高度达 3 m,灾害造成 4 间房屋损毁(图 11(d))。P2 平均形变速率为 38 mm/年,累计形变量为 105.6 mm。该形变区为一中型牵引式次级滑坡,滑体中部树木歪斜,绿化管网断裂,道路垮塌,后缘下错约 5 m,前缘堆积体堆覆沟道内,挤压沟道,堆积高度达 3 m(图 11(e))。

图 11(f)为 P1 特征点、P2 特征点累计形变量与日平均降雨量关系图。可知累计形变曲线可分为两个阶段,2019 年 1 月—2020 年 10 月时间段形变量快速增加,P1 点、P2 点累计形变量分别增加 81 mm、 89 mm。2020 年 10 月之后形变趋势变缓慢,整体趋于稳定。形变曲线在 2019 年 5 月和 2020 年 5 月雨季之后有明显的加速变形趋势(图中浅蓝色区域),说明该滑坡变形与日降雨量密切相关。

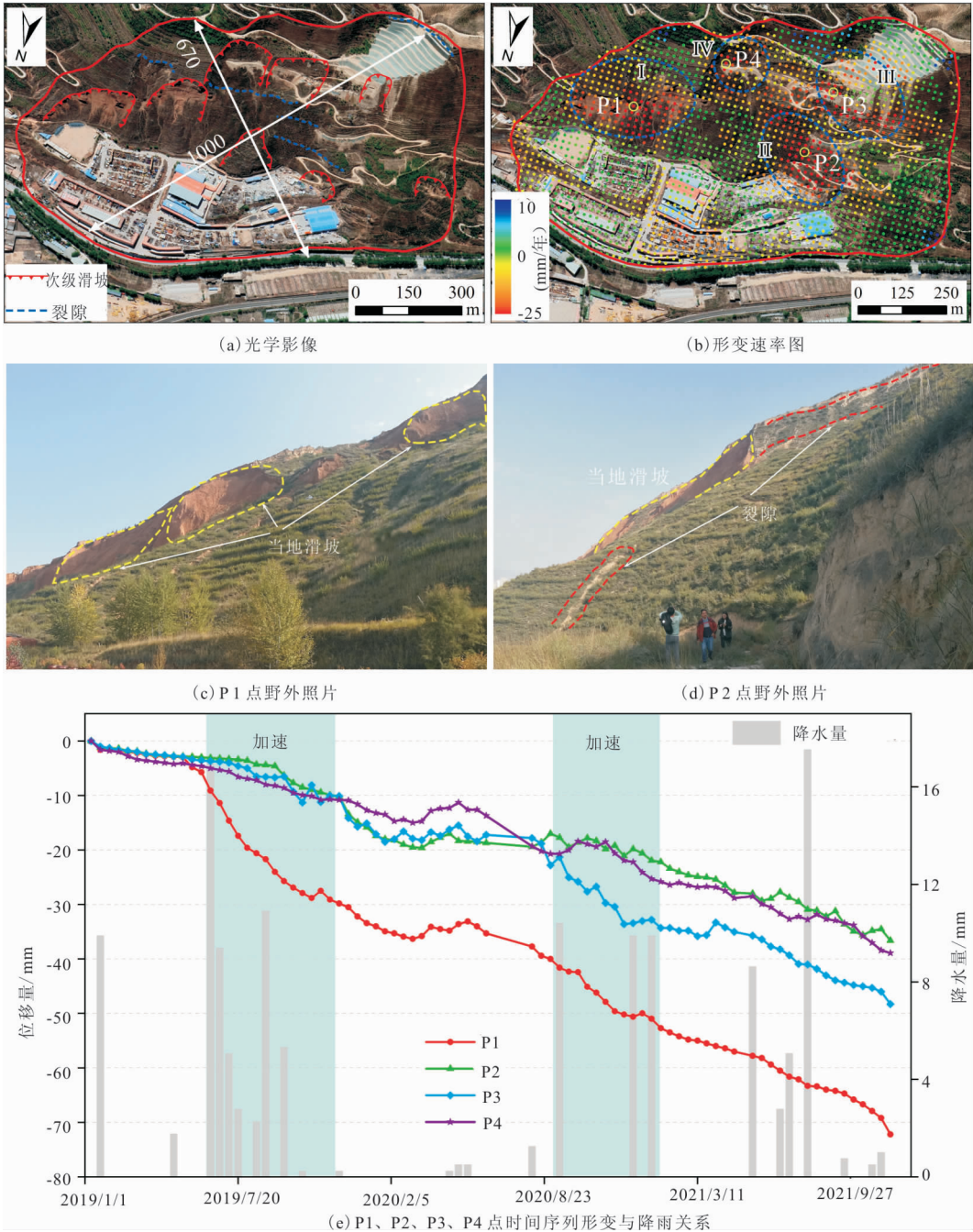


图 10 张家湾滑坡 InSAR 识别结果

Fig. 10 InSAR recognition results of Zhangjiawan landslide

5 结论

研究区位于黄土地区,地表黄土物质广泛覆盖,植被稀少,区域内相干性良好,采用升降轨 Sentinel-1A 数据,基于时序 InSAR 技术对研究区活动滑坡进行识别和形变监测。结论如下:

1)通过对原始 Sentinel-1A 数据进行裁剪,综合考虑时间和空间基线,筛选出若干组干涉对,随后

进行干涉处理(影像配准、生成干涉图、去地形相位、相位解缠等)以及轨道精炼和重去平,最后对形变速率进行估算,识别出区域的显著形变区域。同时结合高分辨率卫星影像,进一步判定及划定滑坡边界范围。共探测到 74 处显著形变区,经过分析,35 处为活动滑坡,其中升轨识别出 14 处、降轨识别出 28 处、升轨和降轨联合识别出 7 处。升轨和降轨数据相结合,能够有效地减少因几何畸变导致的监测“盲区”,从而提高卫星数据的有效探测率。

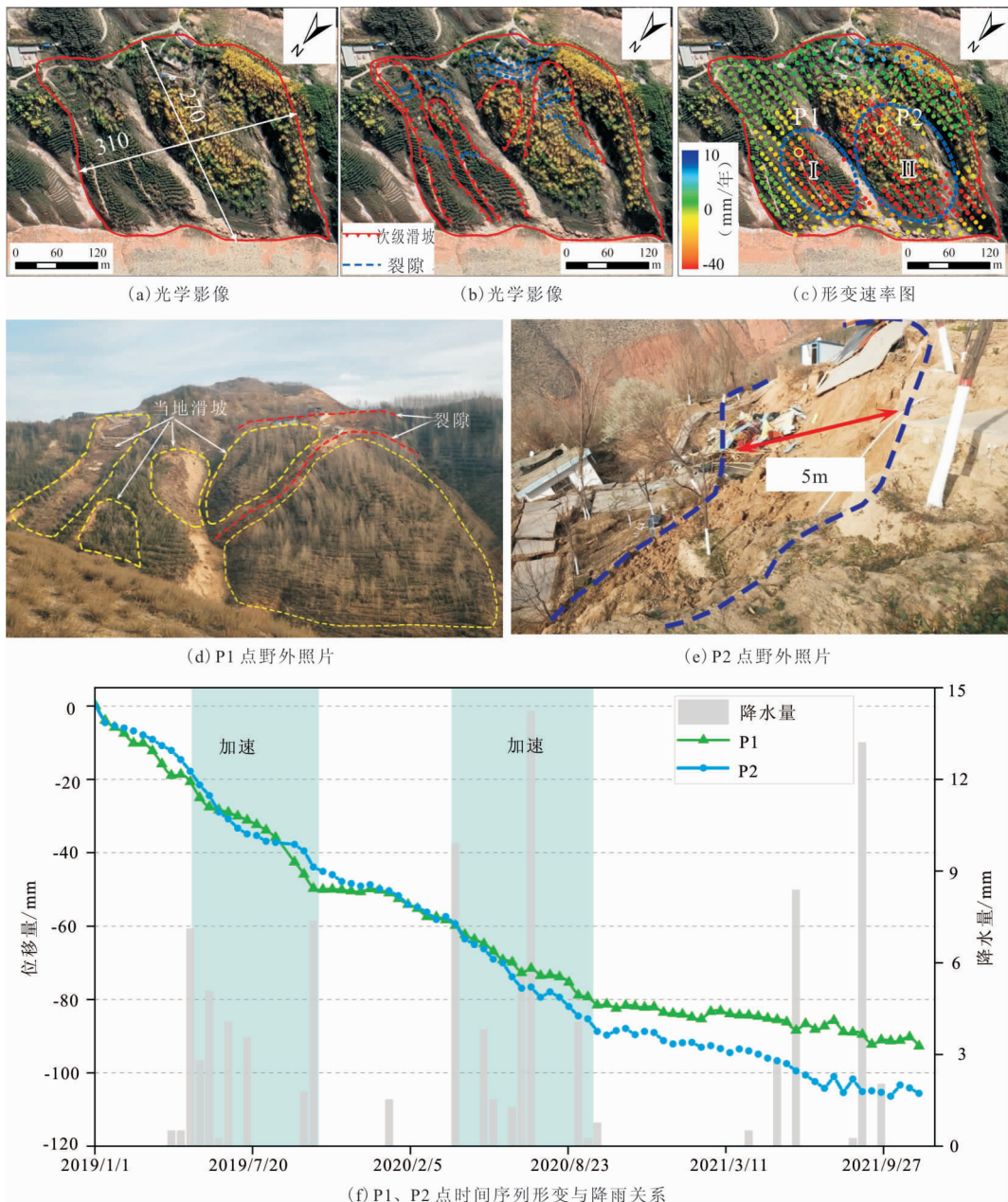


图 11 付家寨滑坡 InSAR 探测结果

Fig. 11 InSAR detection results of Fujiazhai Landslide

2)以张家湾滑坡和付家寨滑坡两个典型滑坡为例,分析了降雨与滑坡时间序列累计形变与降水的关系。分析发现滑坡受降雨入渗的影响,造成黄土、部分泥岩、石膏块软化与崩解,从而使土体物理力学性质发生改变,相对集中且强烈的降雨最终导致滑坡稳定性降低,内在(工程岩组、断层)和外在(降雨)条件的共同作用导致已识别的滑坡在研究时段处于活动状态。

参考文献:

[1] JUANG CH, DIJKSTRA T, WASOWSKI J, et al.

Loess geohazards research in China: advances and challenges for mega engineering projects [J]. Engineering Geology, 2019, 251: 1-10.

- [2] 彭建兵,王启耀,庄建琦,等.黄土高原滑坡灾害形成动力学机制[J].地质力学学报,2020,26(05):714-730. PENG J B, WANG Q Y, ZHUANG J Q, et al. Dynamic mechanism of landslide disaster formation in the Loess Plateau [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26 (05): 714-730. (In Chinese)
- [3] 孟晓捷,张新社,曾庆铭,等.基于加权信息量法的黄土滑坡易发性评价——以1:5万天水市麦积幅为例[J].西北地质,2022,55(02):249-259.

- MENG X J, ZHANG X S, ZENG Q M, et al. Evaluation of loess landslide susceptibility based on weighted information quantity method—a case study of maiji in Tianshui city with 1 : 50,000[J]. Northwest Geology, 2022, 55(02): 249—259. (In Chinese)
- [4] 孙萍萍, 张茂省, 江睿君, 等. 降雨诱发浅层黄土滑坡变形破坏机制[J]. 地质通报, 2021, 40(10): 1617—1625. SUN P P, ZHANG M X, JIANG R J, et al. Deformation and failure mechanism of shallow loess landslides induced by rainfall[J]. Geological Bulletin, 2021, 40(10): 1617—1625. (In Chinese)
- [5] PENG J, WANG S, WANG Q, et al. Distribution and genetic types of loess landslides in China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 170: 329—350.
- [6] PENG J, FAN Z, WU D, et al. Heavy rainfall triggered loess—mudstone landslide and subsequent debris flow in Tianshui, China [J]. Engineering Geology, 2015, 186: 79—90.
- [7] 张学军, 樊延超, 鲍赫, 等. 超大口径空间光学遥感器的应用和发展[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2613—2626. ZHANG X J, FAN Y C, BAO H, et al. Application and development of ultra—large aperture space optical remote sensors [J]. Optical Precision Engineering, 2016, 24(11): 2613—2626. (In Chinese)
- [8] 李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(05): 505—513+540. LI D R, LI M. Research progress and application prospect of UAV remote sensing system[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2014, 39(05): 505—513+540. (In Chinese)
- [9] 郭晨, 许强, 董秀军, 等. 基于 SVF 地形可视化方法的滑坡识别——以四川省丹巴县城典型滑坡为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(06): 705—713. GUO C, XU Q, DONG X J, et al. Landslide recognition based on SVF terrain visualization method—taking typical landslides in Danba county, Sichuan province as an example [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 48(06): 705—713. (In Chinese)
- [10] 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 J J, LI Z W, HU J. InSAR deformation monitoring method and research progress[J]. Journal of Surveying and Mapping, 2017, 46(10): 1717—1733. (In Chinese)
- [11] 葛鹏飞, 刘辉, 陈蜜, 等. 时序 InSAR 监测京雄城际铁路河北段地面沉降[J]. 测绘通报, 2022(07): 64—70. GE P F, LIU H, CHEN M, et al. Time—series InSAR monitoring of ground subsidence in the Hebei section of Beijing—Xiong intercity railway[J]. Surveying and Mapping Bulletin, 2022(07): 64—70. (In Chinese)
- [12] 朱怡飞, 姚鑫, 姚磊华, 等. 基于 InSAR 和光学遥感的贵州鬃岭采煤滑坡识别与危险性评价[J]. 地质力学学报, 2022, 28(02): 268—280. ZHU Y F, YAO X, YAO L H, et al. Identification and risk assessment of coal mining landslide in Zongling, Guizhou based on InSAR and optical remote sensing[J]. Acta Geomechanics, 2022, 28(02): 268—280. (In Chinese)
- [13] 史琨, 宫辉力, 陈蓓蓓, 等. Sentinel—1A 京津冀平原区 2016—2018 年地面沉降 InSAR 监测[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(04): 55—63. SHI M, GONG H J, CHEN B B, et al. Sentinel—1A InSAR monitoring of land subsidence in the Beijing—Tianjin—Hebei plain area from 2016 to 2018 [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(04): 55—63. (In Chinese)
- [14] FRUNEAU B, ACHACHE J, DELACOURT C. Observation and modelling of the Saint—Étienne—de—Tinée landslide using SAR interferometry [J]. Tectonophysics, 1996(265): 181—190.
- [15] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001(39): 8—20.
- [16] 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): 2375—2383.
- [17] FERRETTI A, FUMAGALLI A, NOVALI F, et al. A new algorithm for processing interferometric data—stacks; squeeSAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011(49): 3460—3470.
- [18] 喜文飞, 赵子龙, 李国柱, 等. SBAS—InSAR 技术与无人机影像融合的滑坡变形监测[J]. 测绘通报, 2022(10): 1—6. XI W F, ZHAO Z L, LI G Z, et al. Landslide deformation monitoring based on SBAS—InSAR technology and UAV image fusion [J]. Surveying and Mapping Bulletin, 2022(10): 1—6. (In Chinese)
- [19] 侯燕军, 周小龙, 石鹏卿, 等. “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[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(06):12-20.
- HOU Y J, ZHOU X L, SHI P Q, et al. Application of "air-space-ground" integration technology in early identification of landslide hazards—take the landslide of Lanzhou Putai company as an example[J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention, 2020, 31(06):12-20. (In Chinese)
- [20] 刘陈伟,蒋亚楠,廖露,等. 黑方台主要形变区的 SBAS-InSAR 识别与分析[J]. 测绘科学, 2022, 47(05):56-65.
- LIU C W, JIANG Y N, LIAO L, et al. SBAS-InSAR identification and analysis of the main deformation zone in Heifangtai[J]. Surveying and Mapping Science, 2022, 47(05):56-65. (In Chinese)
- [21] MENG Q, LI W, RASPINI F, et al. Time-series analysis of the evolution of large-scale loess landslides using InSAR and UAV photogrammetry techniques: a case study in Hongheyan, Gansu Province[J]. Northwest China. Landslides, 2020(18):251-265.
- [22] 刘筱怡,杨志华,郭长宝,等. 基于 SBAS-InSAR 的鲜水河断裂带蠕滑型滑坡特征研究[J]. 现代地质, 2017, 31(05):965-977.
- LIU X Y, YANG Z H, GUO C B, et al. Study on the characteristics of creeping landslides in the Xianshuihe fault zone based on SBAS-InSAR[J]. Modern Geology, 2017, 31(05):965-977. (In Chinese)
- [23] 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 identification of landslide disaster hazards in western mountainous areas based on time series InSAR analysis—taking Danba, Sichuan as an example[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2018, 43(12):2039-2049. (In Chinese)

Landslide identification and deformation monitoring in Xining city based on SBAS-InSAR

HE Li^{1,2a}, WU Xiantan^{1,2b}, CHENXin^{2b}, LUO Fang^{2b}, HE Zhengwei^{1,2b},
XUE Dongjian^{1,2b}, BAI Wenqian^{2b}, KANG Guichuan^{2b}, ZHANG Yuxiang^{2b}

(1. Key Laboratory of the Northern Qinghai-Tibet Plateau Geological Processes and Mineral Resources, Xining 810000, China;

2. Chengdu University of Technology a. College of Tourism and Urban-Rural Planning,

b. College of Earth Sciences, Chengdu 610059, China)

Abstract: Landslides occur frequently in the Loess Plateau of China, seriously threatening the development of the economy and the safety of life and property. Using time-series InSAR to identify potential active landslides and monitor their deformation can help prevent and reduce the hazards caused by disasters. InSAR can observe surface deformation on a large scale. In this paper, we focus on Xining City as the research area. We adopted Sentinel-1A radar images with 83 view ascending orbit and 87 view descending orbit. We used the small baseline set (SBAS) time-series InSAR technique to obtain the surface deformation rate and temporal shape variables from January 2019 to November 2021 in the study area, and we detected 74 significant deformation areas. Based on geomorphology features and optical images, we identified 35 as active loess landslides. According to the time-series deformation analysis of active landslides, the interaction of internal conditions (engineering rock group, fault) and external conditions (rainfall) is the main factor that activates the unstable slope or accelerates the slope movement.

Keywords: loess landslide; landslide identification; deformation monitoring; time series InSAR; Xining city