

引用格式: 苏晓军, 张毅, 贾俊, 梁懿文, 李媛茜, 孟兴民. 基于 InSAR 技术的秦岭南部略阳县潜在滑坡灾害识别研究[J]. 山地学报, 2021, 39(1): 59-70

SU Xiaojun, ZHANG Yi, JIA Jun, LIANG Yiwen, LI Yuanxi, MENG Xingmin. InSAR-based monitoring and identification of potential landslides in Lueyang County, the Southern Qinling Mountains, China[J]. Mountain Research, 2021, 39(1): 59-70

## 基于 InSAR 技术的秦岭南部略阳县潜在滑坡灾害识别研究

苏晓军<sup>1a,2</sup>, 张毅<sup>1b,2\*</sup>, 贾俊<sup>3</sup>, 梁懿文<sup>1b,2</sup>, 李媛茜<sup>1b,2</sup>, 孟兴民<sup>1b,2,4</sup>

(1. 兰州大学 a 资源环境学院, b 地质科学与矿产资源学院, 兰州 730000; 2. 甘肃省环境地质与灾害防治技术创新中心, 兰州 730000; 3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安 710054; 4. 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

**摘要:** 秦岭山区因构造活动、人类活动、气候变化等多重因素作用而面临较高的地质灾害风险, 由于地形高差大、坡度陡, 植被覆盖率高, 滑坡灾害识别调查难度大, 急需发展先进的地质灾害监测识别技术体系, 提升高植被覆盖山区地质灾害隐患详细调查识别能力。不同的 InSAR 技术和 SAR 数据有各自的优势, 单一 InSAR 技术难以在高植被覆盖山区进行区域变形监测和地质灾害隐患识别。本研究结合多种 InSAR 技术和不同波段 SAR 数据的探测优势, 对秦岭南部山区略阳县城关镇的 110 km<sup>2</sup> 范围进行对地观测, 综合光学遥感解译和野外调查, 识别出滑坡地质灾害隐患点共 52 处。研究表明: (1) 在高植被覆盖山区, D-InSAR 技术和 L 波段 SAR 数据的应用, 能够提升识别高植被覆盖山区潜在滑坡位置和范围的效率。而时序 InSAR 技术和 Sentinel 数据可应用于典型灾害点时间变形模式分析。(2) 略阳县滑坡主要为黄土滑坡、堆积层滑坡、黄土基岩滑坡三类; 不稳定斜坡主要有陡峭风化基岩不稳定斜坡、不稳定人工边坡, 破坏形式主要为基岩崩塌、剥坠落及黄土斜坡崩滑、泥石流等; 本研究所识别的潜在地质灾害可为略阳县防灾减灾工作提供数据支持, 提出的 InSAR 潜在地质灾害早期识别方法体系可为秦岭及类似高植被覆盖山区地质灾害监测识别提供方法参考。

**关键词:** 秦岭山区; 滑坡; 早期识别; InSAR; 地表形变

**中图分类号:** K903

**文献标志码:** C

秦岭山区地形复杂, 山高坡陡, 岩性软弱。河流侵蚀、活动构造作用、人类活动、气候变化等因素使得地质灾害多发<sup>[1-3]</sup>。研究表明, 2001—2016 年间, 陕南安康、商洛和汉中三市地质灾害最为严重, 占秦岭山区灾害总量的 78.08%<sup>[4-5]</sup>。略阳县是全国地质灾害严重的县市之一<sup>[6]</sup>, 境内主要发育滑

坡、崩塌和泥石流等地质灾害, 受到 1984 年汛期及 2008 年汶川地震等自然因素的影响, 略阳县地质灾害形势更加严峻<sup>[7]</sup>。滑坡隐患的早期识别与调查是灾害管理与防治的基础。而秦岭南部山区地质灾害数量大、分布广、密度大、调查任务重。以往的调查研究存在调查不够全面、详细程度不够等问题。

收稿日期 (Received date): 2020-05-04; 改回日期 (Accepted date): 2020-12-29

基金项目 (Foundation item): 甘肃省科技重大专项 (19ZD2FA002); 国家重点研发计划项目 (2017YFC1501005); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金 (lzujbky-2019-28); 自然资源部中国地质调查局地质调查项目 (DD20190714)。[Science and Technology Major Project of Gansu Province (19ZD2FA002); National Key Research and Development Program of China (2017YFC1501005); Fundamental Research Funds for the Central University (lzujbky-2019-28); Project of China Geological Survey (DD20190714)]

作者简介 (Biography): 苏晓军 (1995-), 男, 青海互助县人, 博士研究生, 主要研究方向: 环境遥感、地质灾害监测与评价。[SU Xiaojun (1995-), male, born in Huzhu County of Qinghai Province, Ph. D. candidate, research on environmental remote sensing, geological disaster monitoring and assessment] E-mail: suxj19@lzu.edu.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): 张毅 (1991-), 男, 甘肃兰州人, 博士, 讲师, 研究方向: 遥感与地质灾害监测预警。[ZHANG Yi (1991-), male, born in Lanzhou, Gansu province, Ph. D., Assistant professor, specialized in remote sensing, geohazard monitoring and early warning research] E-mail: zhangyigeo@lzu.edu.cn

且因为秦岭山区地形复杂、植被覆盖度高,应用单一传统地质灾害调查或者遥感识别技术手段无法满足地质灾害详细调查与防治需求。

随着测绘技术和地理信息系统的发展,多源卫星遥感<sup>[8]</sup>、无人机遥感<sup>[9]</sup>、倾斜摄影等技术手段已经被广泛地应用到地质灾害的识别与分析<sup>[10]</sup>。然而,由于数据重访周期、数据覆盖范围、存档数量等限制,光学遥感手段仍然无法满足大区域、长时间尺度的地质灾害监测与识别。由于具备数据储备丰富、较高的监测精度等技术优势,合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术在滑坡、地表沉降等灾害监测和早期识别方面体现了明显的优势<sup>[11-16]</sup>。在区域尺度上进行潜在滑坡识别、震后滑坡及老滑坡活动性判识,相比传统调查与光学遥感解译手段,InSAR 技术提升识别效率的同时保证了准确性<sup>[17]</sup>。但在秦岭山地区略阳县,该方法应用研究较少。本研究利用多种 InSAR 技术、光学遥感解译和野外调查,建立了基于多种 InSAR 技术的高植被山区潜在滑坡灾害早期识别方法体系,开展了略阳县城及周边潜在滑坡地质灾害的早期识别研究,为相关部门开展地质灾害管理、防治、应急及相关研究提供方法参考和数据支撑。

## 1 研究区概况

略阳县属于陕西汉中市,秦岭西段南部山区,区域海拔高程分布在 567 ~ 2414 m,地貌类型主要包括剥蚀山地和侵蚀-堆积河谷两大类(图 1)<sup>[6-7]</sup>。略阳县出露的地层主要有元古界碧口群沉积碎屑岩类夹流纹质凝灰岩、安山岩等,震旦系砂岩、砂砾岩、千枚岩等,志留系板岩、粉砂岩、泥岩、碳质板岩、千枚岩等,泥盆系以碎屑灰岩夹火山岩,石炭系灰岩为主,夹炭质千枚岩,以及第四系松散堆积层,有更新统的黄土以及零散分布全新统地层,层厚 5 ~ 15 m,主要包括冲积堆积层、洪积堆积层、坡残积堆积层以及风化层<sup>[7,18]</sup>。

区内地质构造复杂(图 2),受到一级构造单元昆仑褶皱系的控制,主要有四组东西向断裂:褒城-略阳深断裂、艾叶-接官亭断裂、茶店-略阳断裂、勉县-阳平关断裂<sup>[7,19]</sup>。上述四组断裂带对略阳县境内岩体的稳定性产生较大影响。区内节理裂隙较为发育,其中北西西走向与北东东走向的节理最为发育,受近东西向断裂构造的控制作用显著,倾角多为 30° ~ 60°。复杂的地质构造使得略阳县斜坡地质灾害易发,提供了充足的泥石流物源<sup>[18]</sup>。

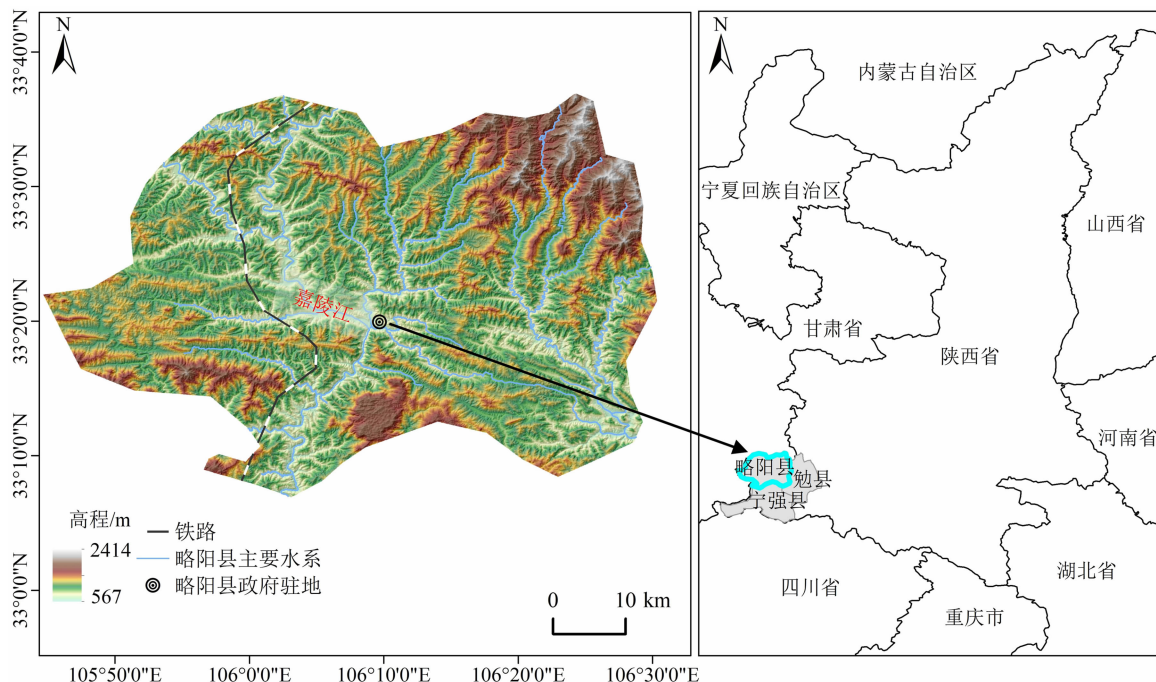


图 1 研究区位置及地形地貌图

Fig. 1 Location and geomorphology of the study area

略阳县处于大陆性气候与海洋性气候区,属大陆性过度气候,四季分明。年均降水量 826.2 mm,年内分配不均,春冬降雨少,夏秋两季多,降水集中在 7—9 月份,降水量自西向东南递减<sup>[19-20]</sup>。研究区内地表水主要为嘉陵江和汉江水系。区内植被覆盖度较高<sup>[21-22]</sup>,且呈现显著增加趋势<sup>[23-24]</sup>。

2 数据与方法

2.1 研究数据

本研究所用数据主要包括:哨兵 1 号(Sentinel-1A)和 ALOS-2(Advanced Land Observation Satellite)的微波遥感数据。C 波段成像的 Sentinel-1 A 干涉

宽幅单视复数(Single Look Complex, SLC)数据几何分辨率为 5 m × 20 m。ALOS-2 卫星采用 L 波段成像,几何分辨率 3 m × 8 m。以美国航空航天局(NASA)的 SRTM 数据(30 m 分辨率)为参考去平地效应及地理编码。哨兵数据获取时间为 2018 年 3 月 5 日至 2019 年 5 月 11 日,ALOS-2 数据获取时间为 2018 年 11 月 01 日和 2019 年 5 月 16 日(表 1)。

2.2 研究方法

2.2.1. PS-InSAR 方法

PS-InSAR (Permanent Scatterers InSAR, PS-InSAR)技术,是由意大利科学家 Ferretti 首次提出,并不断发展优化<sup>[25]</sup>。根据其理论假设,从所获取 36 景哨兵 1 号数据中选取 2018 年 10 月 7 日影像为主影像,其余 35 景影像作为副影像与主影像进行干

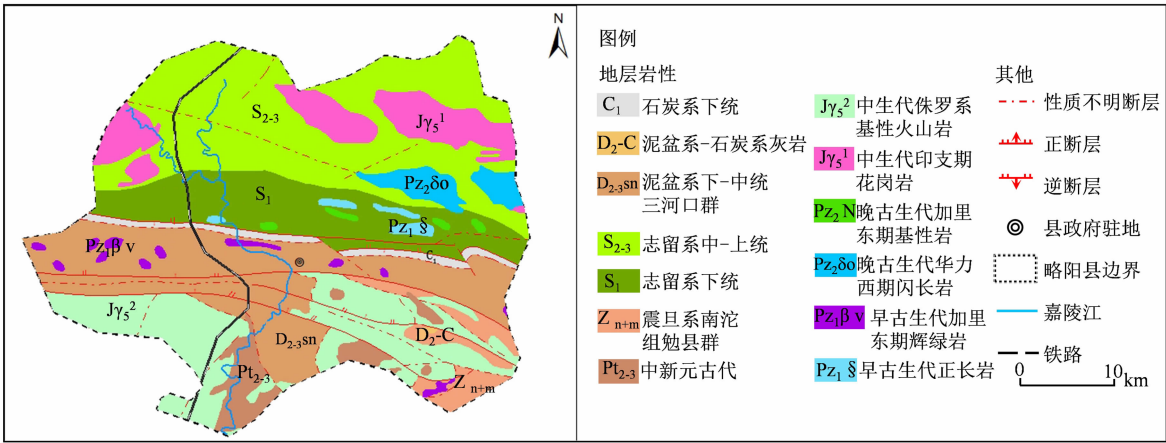


图 2 略阳县区域地质构造图<sup>[6-7]</sup>  
Fig.2 Regional geological structure map of Lueyang county<sup>[6-7]</sup>

表 1 SAR 影像及具体监测时间  
Tab.1 Specific monitoring date of SAR images

序号	监测日期	序号	监测日期	序号	监测日期	序号	监测日期
1	2018-03-05	10	2018-06-21	19	2018-10-07	28	2019-01-23
2	2018-03-17	11	2018-07-03	20	2018-10-19	29	2019-02-04
3	2018-03-29	12	2018-07-15	21	2018-10-31	30	2019-02-16
4	2018-04-10	13	2018-07-27	22	2018-11-12	31	2019-02-28
Sentinel	5	14	2018-08-08	23	2018-11-24	32	2019-03-12
	6	15	2018-08-20	24	2018-12-06	33	2019-03-24
	7	16	2018-09-01	25	2018-12-18	34	2019-04-05
	8	17	2018-09-13	26	2018-12-30	35	2019-04-29
	9	18	2018-09-25	27	2019-01-11	36	2019-05-11
ALOS-2	1	2	2019-05-16				

涉得到 35 幅干涉图,副影像与主影像的空间基线距离在 125 m 以内(图 3)。生成干涉图之后利用 DEM 数据模拟并去除地形相位,利用整体相位离散度和相位标准差筛选 PS 点之后,通过时空域滤波估计并去除存在高程误差、轨道误差及大气效应的相位,精确计算形变相位,从而获取可靠地表形变信息<sup>[17]</sup>。

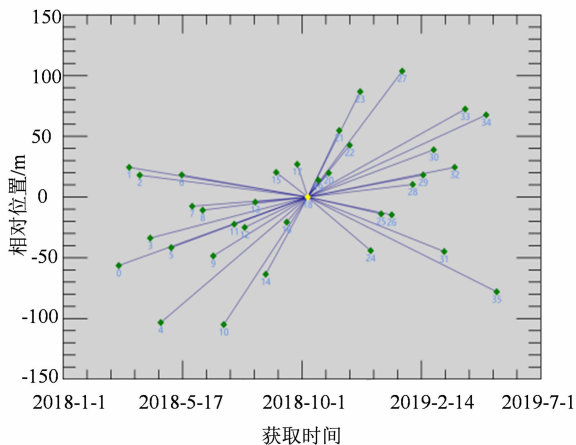


图 3 哨兵一号数据获取时间及 PS-InSAR 处理主副影像空间基线图

Fig. 3 Acquisition time of Sentinel-1A data and spatial baseline diagram of PS-InSAR processing

### 2.2.2 SBAS-InSAR 方法

SBAS-InSAR (Small Baseline Subset-InSAR) 技术设定一定的空间基线与时间基线阈值连接 SAR 影像,建立若干小基线集合。在小基线集内相对干涉生成干涉图之后,进行相位解缠,利用最小二乘法和奇异值分解估计形变相位及误差,然后通过空间域低通滤波和时间域高通滤波分离并去除大气相位延迟,最终得到形变结果<sup>[26-27]</sup>。SBAS-InSAR 技术关键处理包含:单视复数影像的配准、单视复数影像预滤波、干涉图生成、相位解缠、轨道精炼与重去平地效应、滤波去除大气相位、地理编码等步骤<sup>[17]</sup>。SBAS-InSAR 方法的突出特点是综合考虑时间、空间基线的相关性来选取多幅主影像,以增强相干性,得到的更多高相干点。

### 2.2.3 D-InSAR 方法

D-InSAR (Differential InSAR) 技术是定量遥感技术手段之一,广泛应用于滑坡、泥石流等地质灾害的应急调查测算,在应用中具有很好的效果<sup>[28-29]</sup>。主要处理步骤包括影像配准、干涉及空域滤波、相位

解缠、地理编码等步骤。对配准及重采样后的影像进行干涉处理得到干涉相位,之后利用 DEM 去除地形相位得到差分相位,再进行解缠计算得到形变相位,最后经过地理编码得到地表变形,其监测精度可以达到厘米级甚至毫米级。

## 3 研究结果

### 3.1 时序 InSAR 技术监测地表形变

时序 InSAR 技术监测结果为地表形变速率。PS-InSAR 技术最终以 0.7 为相干性阈值提取 PS 变形点 24 029 个,分布平均密度为 218 个/ $\text{km}^2$ ,形变速率分布在  $-25 \sim 23 \text{ mm/y}$ 。形变点主要分布在略阳县城城关镇、周边村镇建筑物、河谷两侧较缓斜坡等(图 4)。

SBAS-InSAR 技术监测结果显示相干点数量 13 412 个,平均密度 121 个/ $\text{km}^2$ ,形变速率分布在  $-38 \sim 17 \text{ mm/y}$ ,主要聚集在较为稳定的城关镇居民区及周边灾害分布区域(图 5),而主要形变区域分布在县城以西嘉陵江沿岸斜坡及凤凰山等。

尽管 PS-InSAR 技术得到高相干点的密度大于 SBAS-InSAR 监测结果的密度,但 PS-InSAR 方法中噪声点分布较多,而 SBAS-InSAR 技术更适合监测高原、山地等起伏较大的不平坦地表形变信息,能够有效抑制噪声信息。

### 3.2 D-InSAR 监测地表形变

针对复杂地形、植被高覆盖等问题,本研究基于 D-InSAR 技术利用两期高分辨率 ALOS-2 数据监测了略阳城关区地表形变量。监测结果显示,在 2018 年 11 月 1 日至 2019 年 5 月 16 日,略阳县城关区主城区形变量最大达到 28 cm,主要分布在县城以西嘉陵江两岸支沟、八渡河沿岸及略钢社区等地的西向斜坡。监测形变结果与实际发育的小型滑坡隐患相一致,这类隐患多由开挖、加载等人为因素引起(图 6)。依据 D-InSAR 监测形变结果,圈定不稳定形变区,作为对比补充数据结果。

### 3.3 基于 InSAR 技术的滑坡隐患识别

本研究根据 InSAR 监测形变结果,综合光学遥感影像上斜坡地形地物纹理特征与实地调查,识别得到略阳县城潜在滑坡灾害隐患点 52 处(图 7)。其中有活动滑坡 11 处,主要有堆积层滑坡、黄土基岩滑坡、黄土滑坡三类。不稳定斜坡 41 处,主要有



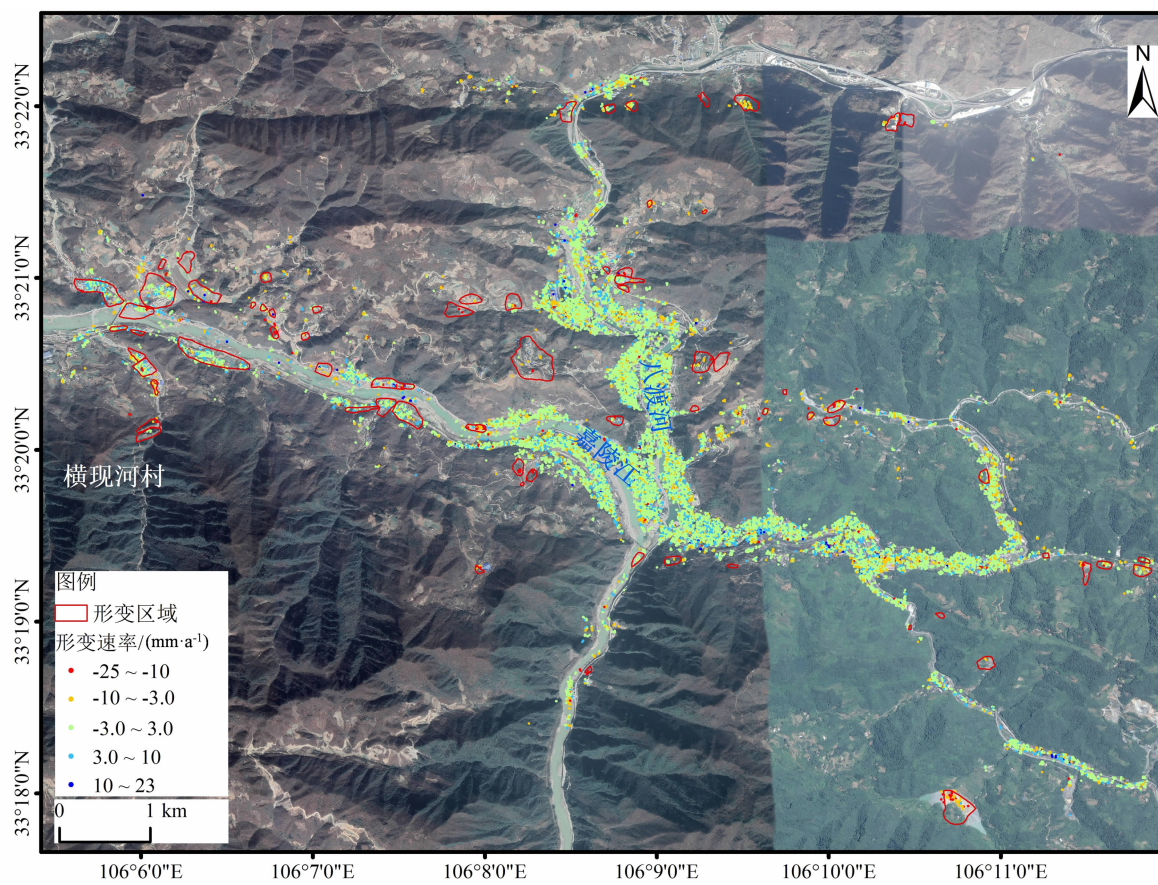


图 4 PS-InSAR 技术监测略阳县城关镇地表形变

Fig. 4 Surface deformation detected by PS-InSAR in Chengguan, Lueyang County

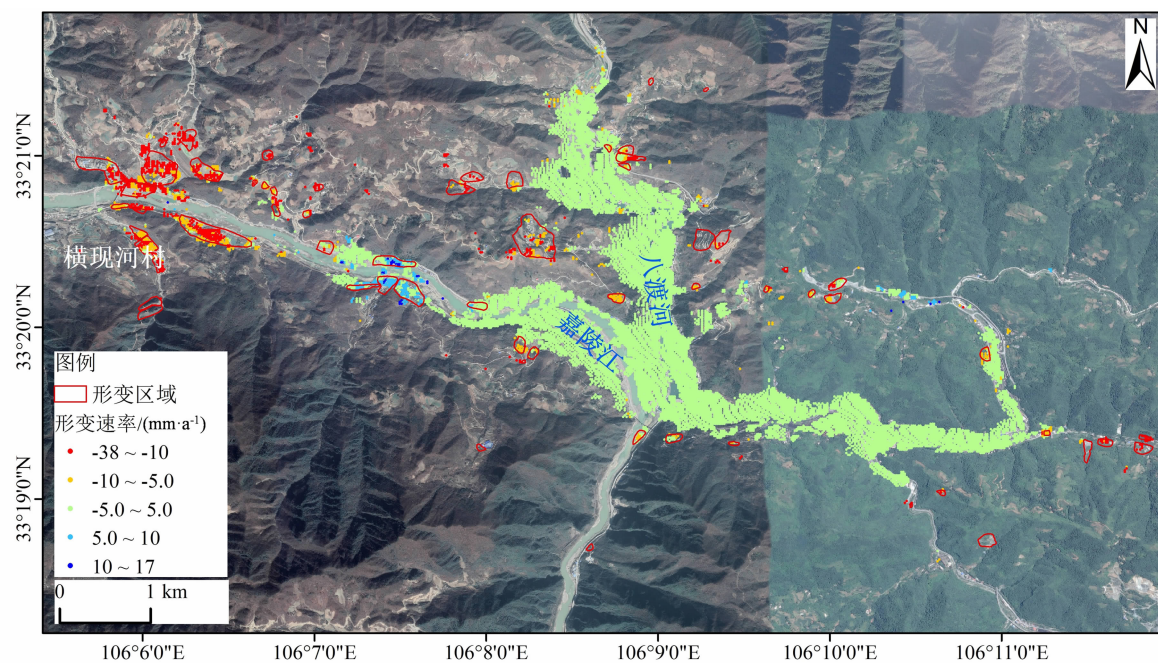


图 5 SBAS-InSAR 技术监测略阳县城关镇地表形变

Fig. 5 Surface deformation detected by SBAS-InSAR in Chengguan, Lueyang County



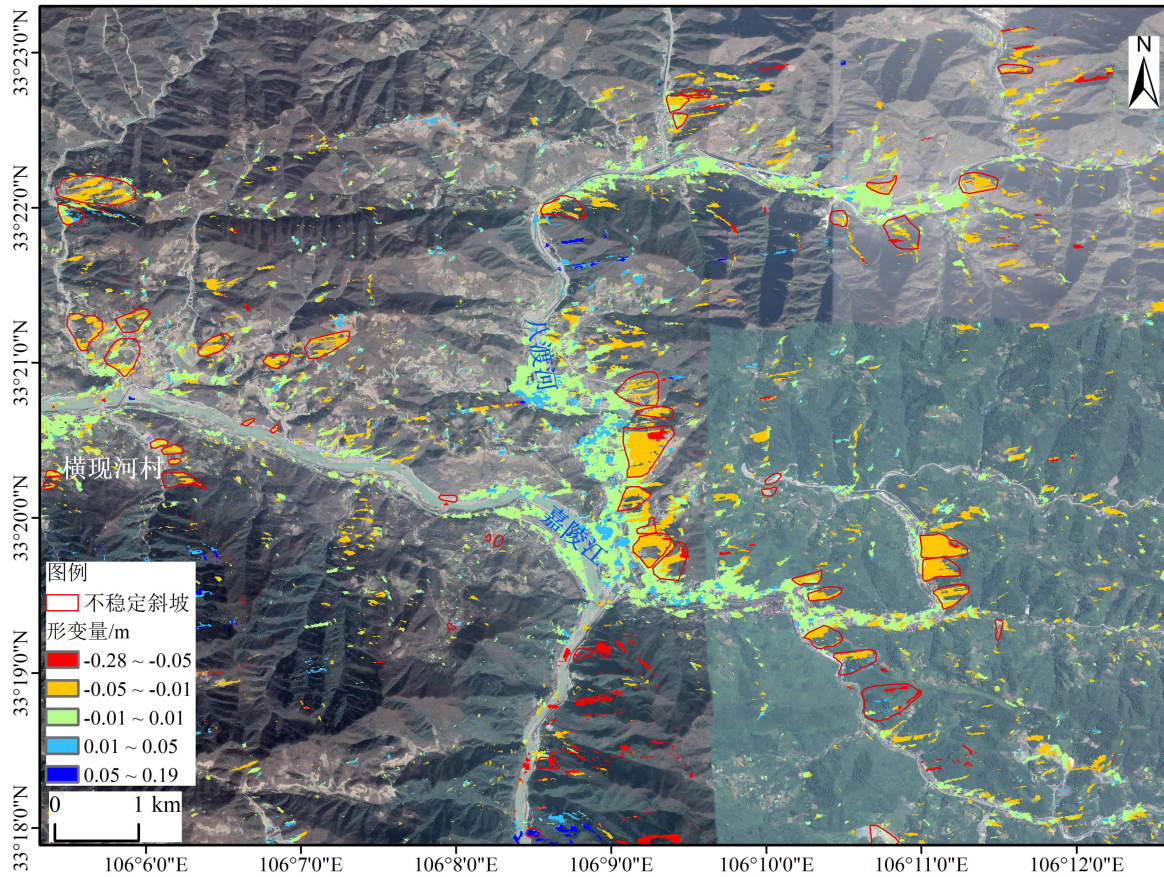


图 6 ALOS-2 数据 D-InSAR 监测地表形变量与初步圈定不稳定斜坡

Fig. 6 Surface deformation and preliminary identification of unstable slopes by D-InSAR with ALOS-2 Data

陡峭风化基岩斜坡、不稳定人工边坡、黄土斜坡。灾害破坏形式主要为基岩崩塌、剥坠落及其黄土斜坡崩滑、泥石流等。较为典型的有凤凰山、略钢社区后山等潜在滑坡地质灾害。火车站以东南水泉湾附近,发育有小规模崩塌、土质滑坡等。

### 3.3.1 凤凰山滑坡

凤凰山潜在滑坡隐患位于县政府大院后(东),山体陡峭,植被覆盖度极高。斜坡受降水作用长期影响,软弱基岩风化破碎。

凤凰山滑坡 I (图 8) 坡前部较中后部更陡峭,滑坡整体坡度约  $35^\circ$ 。滑坡后缘海拔 845 m,前缘坡脚海拔 660 m。滑坡形态为后窄前宽的簸箕状,最宽处约 430 m,长约 350 m,厚约 5 ~ 6 m,面积约为  $9 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。该滑坡已经于上世纪末由挡墙、格构等工程治理,但 InSAR 技术监测到其形变量约 10 cm,滑坡形变主要集中在中上部及后缘,表现在多处格构开裂、错断。后缘推挤导致坡体前缘崩塌,落石;山前城区县政府等家属院内住宅楼墙体出现多处裂缝,裂缝宽 1 ~ 2 cm (图 8)。

凤凰山滑坡 II 监测最大形变量达 28 cm,该滑坡隐患最宽处达 280 m,长约 350 m。缺乏工程治理措施,坡体植被覆盖程度较好,山前楼宇建筑密集,人口密度较大。该隐患严重威胁居民生命财产安全,应该加强监测预警工作与防治研究。

### 3.3.2 略钢社区滑坡

略钢社区东侧山体滑坡形变破坏严重(图 9),坡脚外露板岩、片岩,上覆黄土及堆积层,植被覆盖较好。监测形变量达到 8 cm。学校后山活动滑坡长度约 270 m,宽度约 90 m。2012 年秋降雨后发生崩塌、滚石,楼房后墙受推挤开裂严重。略钢社区房屋墙体开裂数厘米,贯通长度达 3 m,社区院墙隆起约 5 cm,学校和社区面临一定灾害风险。

### 3.3.3 省道 309 滑坡

该黄土基岩滑坡位于省道 S309 公路边坡,滑坡前缘外露千枚岩,产状为  $330^\circ \angle 4^\circ$ ,滑动方向与基岩倾向基本一致,由于强烈推挤作用,下伏基岩产生严重褶曲,滑动带为黄土基岩接触带。D-InSAR 监测形变量约 5 cm,主要为浅层黄土崩塌。同时,该



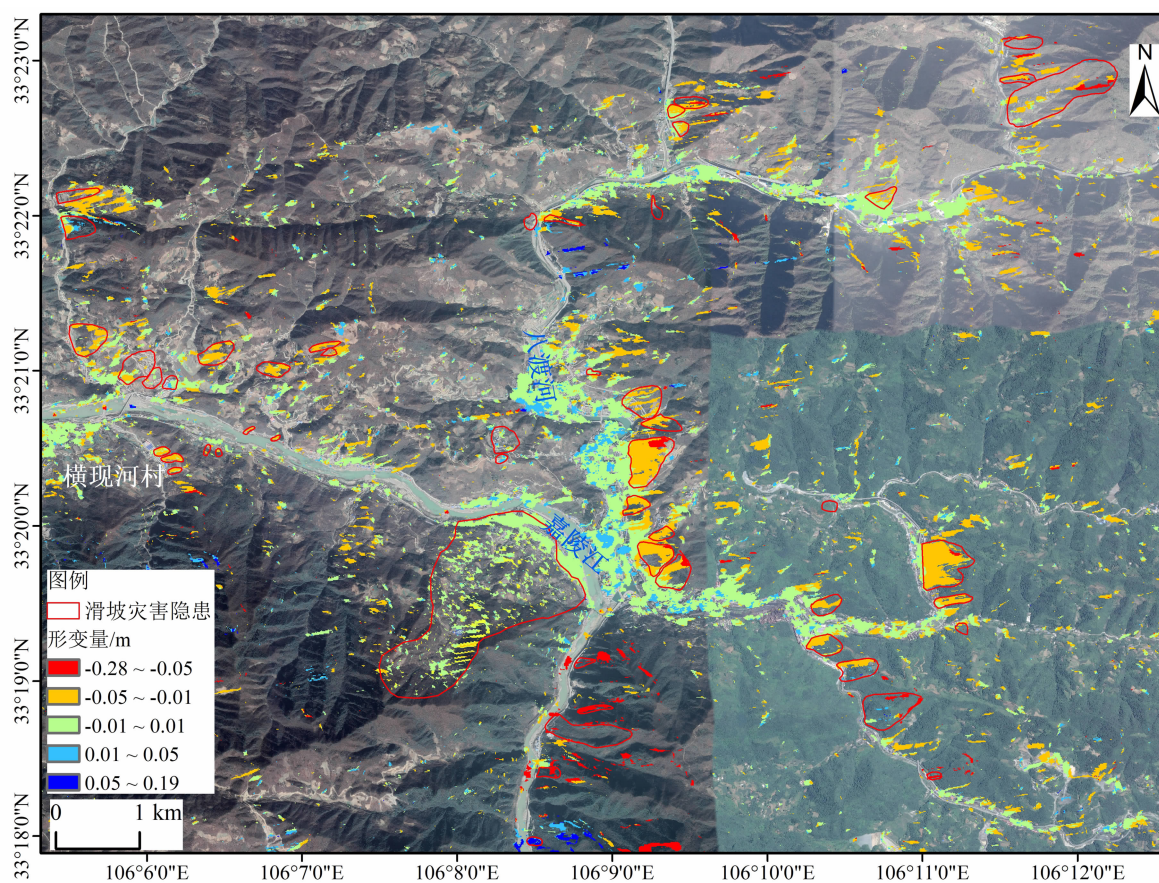


图 7 InSAR 技术监测识别略阳县城关镇滑坡隐患

Fig. 7 landslides detected by InSAR in Chengguan, Lueyang County

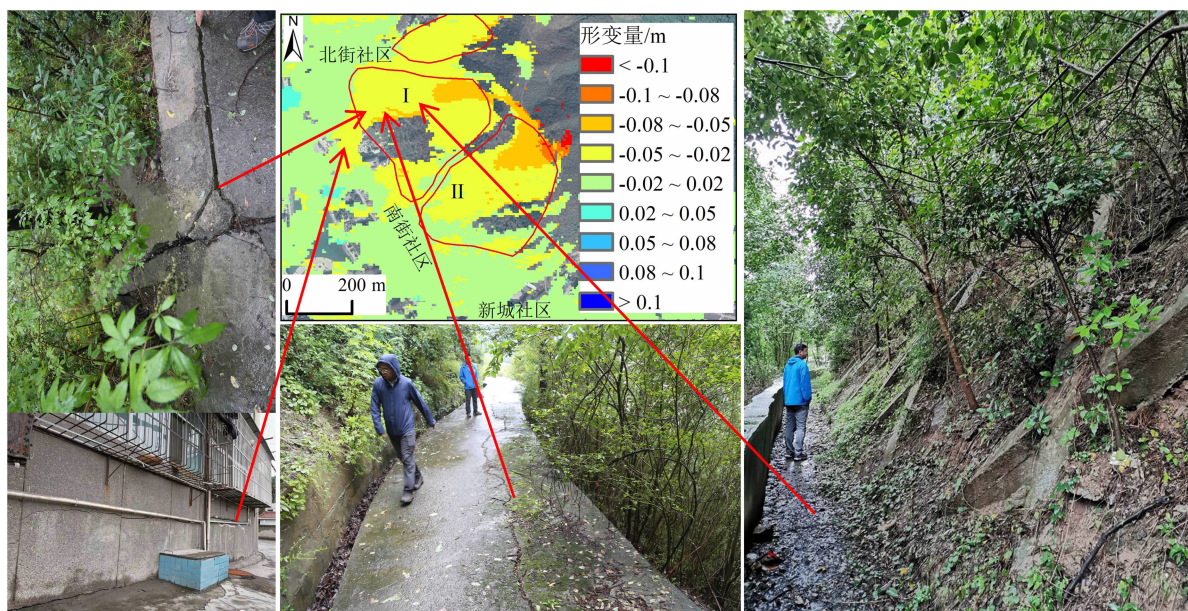


图 8 县政府大院后凤凰山滑坡灾害隐患监测形变结果及其形变迹象

Fig. 8 Monitoring deformation and evidences of Fenghuangshan landslide behind the Lueyang government compound



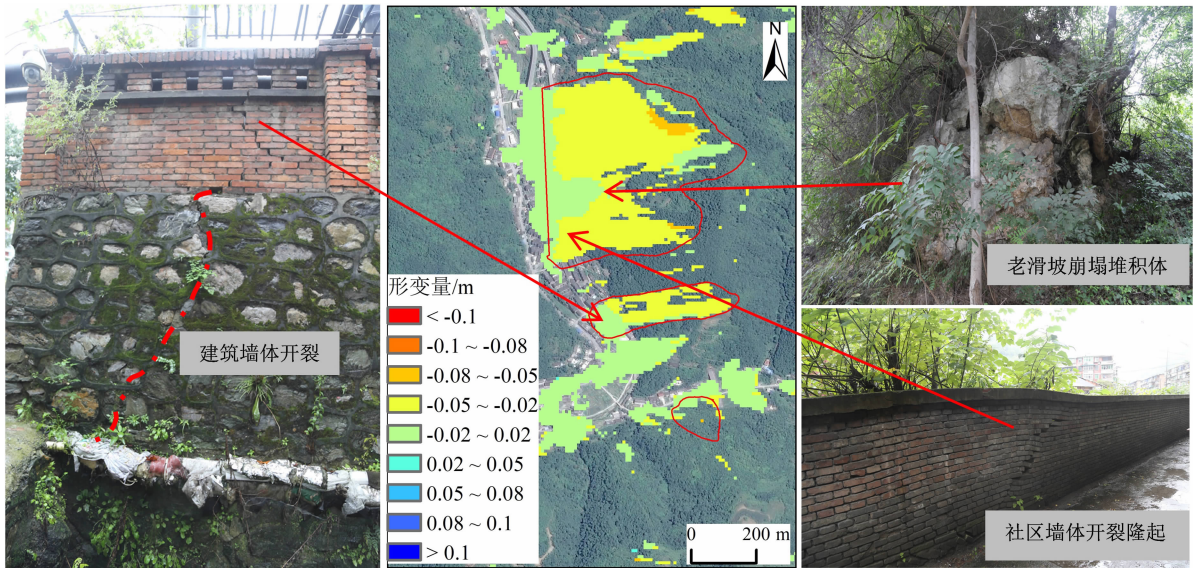


图 9 略钢社区后山滑坡灾害隐患监测形变结果及其形变迹象

Fig. 9 Monitoring deformation and evidences of landslide at Luegang Community

滑坡前省道路基填方材料由于长期的河流侵蚀及降水浸润而产生沉降、崩塌,公路和行人安全也受到威胁(图 10)。



图 10 省道 309 旁老滑坡

Fig. 10 Old landslide beside 309 Provincial Road

### 3.4 基于 InSAR 技术的高植被覆盖山区潜在地质灾害早期识别方法体系

时序 InSAR 技术可以监测较长时间地表平均形变速率,可以满足时序形变特征分析。PS-InSAR 技术处理简捷高效,普遍适用于城镇区域地表形变与变化监测,但在略阳植被高度覆盖的山地区域无法全面获取斜坡形变信息。SBAS-InSAR 技术更适用于山区复杂地表的变形监测,但是植被季节性变化引起的时间失相干导致最后输出相干像元密度较低。因此,时序 InSAR 技术无法满足高植被覆盖区

变形监测和潜在地质灾害识别需求,加之 C 波段 Sentinel-1A 数据无法穿透茂密植被层,对于凤凰山滑坡、略钢社区滑坡等斜坡体相对完整、植被覆盖完好和变形速率较大的复活滑坡,无法全面获取斜坡形变信息,产生“漏测”情况。而 D-InSAR 技术能够利用干涉质量较好的像对提取区域地表形变信息,能够达到识别潜在变形斜坡位置和范围的目的。加之 L 波段 ALOS-2 数据可以穿透植被,直接获取地面回波信息,可以有效提升像对的干涉质量,使得 D-InSAR 技术在高植被覆盖区的应用更为有效

综合考虑不同 InSAR 技术在高植被覆盖山区的形变监测能力、不同类型 SAR 数据植被穿透能力及数据存档数量,建立如下高植被覆盖山区的地表形变监测与潜在地质灾害早期识别方法体系(图 11):

(1)收集资料,深入理解区域地质环境背景和灾害发育特征等基本现状;

(2)根据研究需求和预算查询、下载和购置研究区 Sentinel 数据和 ALOS-2 数据;

(3)利用 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 开展时序地表形变监测,进行区域尺度的地表形变监测和潜在地质灾害识别,并检查确定干涉质量较好的干涉像对,以服务于 D-InSAR 区域地表形变监测;

(4)利用 D-InSAR 技术处理上一步确定的干涉像对,提取区域变形信息。在数据干涉质量无法满



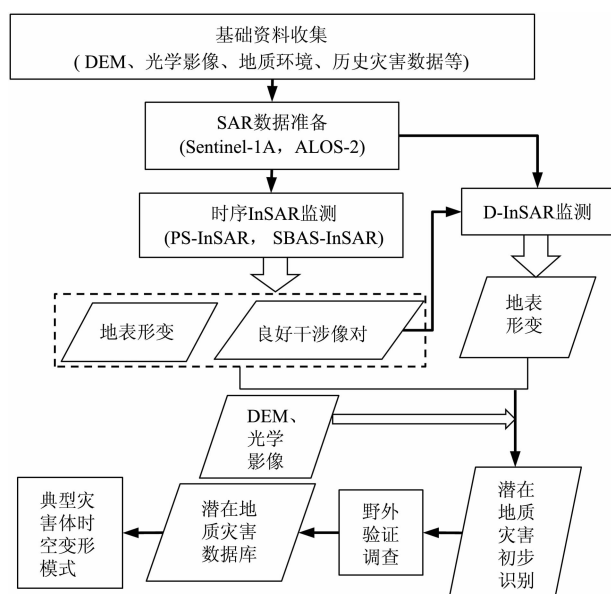


图 11 基于 InSAR 技术监测识别地质灾害隐患方法体系

Fig. 11 Method for early identification of potential geohazards in dense-vegetation covered mountainous area based on InSAR

足识别需求的情况下引入时间基线较短的 L 波段 ALOS-2 数据,以提升区域干涉质量和地表形变监测结果准确度;

(5) 基于 D-InSAR 获取的地表形变数据和高精度遥感影像,基于已有潜在地质灾害点建立区域潜在地质灾害遥感判识标准,在高精度遥感影像、谷歌三维环境和山体阴影 DEM 的辅助下对区域潜在地质灾害进行识别;

(6) 根据室内潜在地质灾害识别结果,制定野外考察路线,开展野外详细考察,验证和更新潜在地质灾害识别结果,记录潜在地质灾害发育特征、类型,分析其潜在致灾模式,建立潜在地质灾害数据库;

(7) 基于 D-InSAR 和时序 InSAR 技术获取的地表变形速率和时间序列变形,结合地震、降雨和人类活动等灾害诱发因素对典型潜在灾害体的时空变形模式进行分析和总结。

## 4 结论与展望

本研究基于多种 InSAR 技术、光学遥感解译与野外详细调查完成了略阳县城及周边滑坡潜在地质灾害的早期识别研究,进一步建立了基于多种 InSAR 技术的高植被山区潜在地质灾害早期识别方

法体系,为相关部门开展地质灾害管理、防治、应急及相关研究提供方法参考和数据支撑。主要结论如下:

(1) 本研究基于 PS-InSAR 与 SBAS-InSAR 技术获得地表不稳定斜坡平均形变速率大于 10 mm/a, D-InSAR 技术监测到半年期间形变量最高达到 28 cm。变形斜坡主要分布在县城以西嘉陵江两岸支沟、八渡河沿岸及略钢社区等地的西向斜坡。

(2) 基于 InSAR 监测地表形变信息,结合光学遥感解译与野外调查识别潜在滑坡地质灾害隐患点共 52 处,活动滑坡 11 处,主要为堆积层滑坡和黄土基岩滑坡,其中 6 处复活老滑坡;不稳定斜坡 41 处,以风化基岩斜坡、黄土斜坡为主。灾害破坏形式主要为基岩崩塌、剥坠落及其黄土斜坡崩滑、泥流等。

(3) 基于两种时序 InSAR 监测方法应用 Sentinel-1A 数据对略阳县城关镇城区地表形变及不稳定斜坡进行监测与解译识别,SBAS-InSAR 技术在山区较强的监测能力在本次研究中得到验证;针对复杂地形、植被高覆盖等因素在时序 InSAR 监测中造成的失相干等问题,基于 D-InSAR 技术利用两期高分辨率 ALOS-2 数据像对监测解译略阳城关区不稳定斜坡,研究表明 D-InSAR 技术适用于略阳山区地表形变监测与灾害识别应用研究,其监测精度可以达到厘米级。不同 InSAR 方法综合应用,可以更高效全面识别潜在滑坡隐患。

在未来研究中,利用 InSAR 技术全面监测识别略阳县全境地质灾害隐患,在灾害分布规律、控制因素及发育特征等方面进行更深入的研究;针对凤凰山、略钢社区后山等单体滑坡隐患,进行更长时序监测,研究其时序变形特征与形变破坏规律,为略阳县地质灾害综合调查与防治提供科学依据。

## 参考文献 (References)

- [1] 孙果梅,况明生,曲华. 陕西秦巴山区地质灾害研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 240 - 243. [SUN Guomei, KUANG Mingsheng, QU Hua. Research of geological disaster in Qingling-Bashan Mountains [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(5): 240 - 243] DOI: 10.3969/j. issn. 1005 - 3409. 2005. 05. 062
- [2] 黄玉华,武文英,冯卫,等. 秦岭山区南秦河流域崩滑地质灾害发育特征及主控因素[J]. 地质通报, 2015, 34(11): 2116 - 2122. [HUANG Yuhua, WU Wenying, FENG Wei, et al. Characteristics of main controlling factors of landslide in Nanqin River, Qinling

- Mountains [J]. Geological Bulletin of China, 2015, **34** (11): 2116–2122 DOI: 10.3969/j.issn.1671–2552.2015.11.018
- [3] 陆松年, 陈志宏, 李怀坤, 等. 秦岭造山带中—新元古代(早期)地质演化[J]. 地质通报, 2004, **23** (2): 107–112. [LU Songnian, CHEN Zhihong, LI Huaikun, et al. Late Mesoproterozoic-early Neoproterozoic evolution of the Qinling orogen [J]. Geological Bulletin of China, 2004, **23** (2): 107–112] DOI: 10.3969/j.issn.1671–2552.2004.02.002
- [4] 宁奎斌, 李永红, 何倩, 等. 2000~2016 年陕西省地质灾害时空分布规律及变化趋势[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, **29** (1): 93–101. [NING Kuibin, LI Yonghong, HE Qian, et al. The spatial and temporal distribution and trend of geological disaster in Shaanxi Province from 2000 to 2016 [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, **29** (1): 93–101] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003–8035.2018.01.15
- [5] 陈玺, 张毅, 陈冠, 等. SBAS-InSAR 技术在水市市区地表形变监测中的应用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, **54** (2): 143–148. [CHEN Xi, ZHANG Yi, CHEN Guan, et al. Detecting ground deformation in Tianshui City based on SBAS-InSAR [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2018, **54** (2): 143–148] DOI: 10.13885/j.issn.0455–2059.2018.02.001
- [6] 王琳. 略阳县地质灾害群测群防体系建设及典型群测群防点致灾效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2011: 1–10. [WANG Lin. Study on establishment the mass prediction and disaster prevention system of geological hazard and hazard effect of typical geological disasters in Lueyang County [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011: 1–10]
- [7] 成大业. 略阳县地质灾害特征及典型灾害形成机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2011: 2–4. [CHENG Daye. The research on characteristics and formation mechanism of geological disasters in Lue Yang County [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011: 2–4]
- [8] 郭长宝, 唐杰, 吴瑞安, 等. 基于证据权模型的川藏铁路加查—朗县段滑坡易发性评价[J]. 山地学报, 2019, **37** (2): 240–251. [GUO Changbao, TANG Jie, WU Ruian, et al. Landslide susceptibility assessment based on WOE model along Jiacha-Langxian County section of Sichuan—Tibet Railway, China [J]. Mountain Research, 2019, **37** (2): 240–251] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000418
- [9] 伍康林, 陈宁生, 胡桂胜, 等. 四川省盐源县玻璃村“7·19”特大滑坡灾害应急科学调查[J]. 山地学报, 2018, **36** (5): 806–812. [WU Kanglin, CHEN Ningsheng, HU Guisheng, et al. Emergency investigation to 7·19 landslide disaster in Boli Village, Yanyuan County, Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2018, **36** (5): 806–812] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000376
- [10] 管建军, 王俊豪, 王双亭, 等. 无人机倾斜摄影在黄土地区泥石流灾害调查与评价中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, **28** (4): 137–145. [GUAN Jianjun, WANG Junhao, WANG Shuangting, et al. Application of UAV oblique photography in investigation and evaluation of debris flow disasters in loess area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, **28** (4): 137–145] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003–8035.2017.04.22
- [11] KANG Ya, ZHAO Chaoying, ZHANG Qin, et al. Application of InSAR techniques to an analysis of the Guanling landslide [J]. Remote Sensing, 2017, **9** (10): 1046–1062. DOI: 10.3390/rs9101046
- [12] ZHAO Chaoying, KANG Ya, ZHANG Qin, et al. Landslide identification and monitoring along the Jinsha River Catchment (Wudongde Reservoir Area), China, using the InSAR method [J]. Remote Sensing, 2018, **10** (7): 993–1012. DOI: 10.3390/rs10070993
- [13] ZHAO Fumeng, MENG Xingmin, ZHANG Yi, et al. Landslide susceptibility mapping of Karakorum Highway combined with the application of SBAS-InSAR technology [J]. Sensors, 2019, **19** (12): 2685–2702. DOI: 10.3390/s19122685
- [14] 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 Karakorum Highway based on SBAS-InSAR technology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, **47** (1): 142–152] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000–3665.201902020
- [15] 姚佳明, 姚鑫, 陈剑, 等. 基于 InSAR 技术的缓倾煤层开采诱发顺层岩体地表变形模式研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, **47** (3): 135–146. [YAO Jiaming, YAO Xin, CHEN Jian, et al. A study of deformation mode and formation mechanism of a bedding landslide induced by mining of gently inclined coal seam based on InSAR technology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, **47** (3): 135–146] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000–3665.201903072
- [16] 雷坤超, 陈蓓蓓, 宫辉力, 等. 基于 PS-InSAR 技术的天津地面沉降研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, **40** (6): 106–111. [LEI Kunchao, CHEN Beibei, GONG Huili, et al. Detection of land subsidence in Tianjin based on PS-InSAR technology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, **40** (6): 106–111] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000–3665.2013.06.014
- [17] 张毅. 基于 InSAR 技术的地表变形监测与滑坡早期识别研究——以白龙江流域中游为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2018: 28–29. [ZHANG Yi. Detecting ground deformation and investigating landslides using InSAR technique—taking middle reach of Bailong River Basin as an example [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018: 28–29]
- [18] 董志海. 象山不稳定斜坡变形破坏机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2014: 6–14. [DONG Zhihai. Research on the deformation mechanism of Xiangshan slope [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014: 6–14]
- [19] 王树丰. 汶川地震滑坡微型桩防治工程研究——以陕西略阳

- 凤凰山滑坡为例 [D]. 西安: 长安大学, 2010: 13 - 17. [WANG Shufeng. Research on the prevention engineering of micropilr for landslides triggered by Wenchuan Earthquake——by taking the Phoenix Mountain landslide at Lueyang County, Shaanxi Province as an example [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010: 13 - 17]
- [20] 刘坤. 白雀寺滑坡复活机理及稳定性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015: 7 - 9. [LIU Kun. Research on the revival mechanism and stability of Baiquesi landslide [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015: 7 - 9]
- [21] 张楠. 陕西省略阳县重点生态功能区保护和建设规划研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014: 15. [ZHANG Nan. Study on the protection and construction planning of Shaanxi Lueyang national key ecological function zones [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014: 15]
- [22] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000 - 2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因 [J]. 地理学报, 2015, **70** (5): 705 - 716. [LIU Xianfeng, PAN Yaozhong, ZHU Xiufang, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qinling-Daba Mountains in relation to environmental factors [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70** (5): 705 - 716] DOI: 10.11821/dlxb201505003
- [23] 崔晓临, 白红英, 王涛. 秦岭地区植被 NDVI 海拔梯度差异及其气温响应 [J]. 资源科学, 2013, **35** (3): 618 - 626. [CUI Xiaolin, BAI Hongying, WANG Tao. Difference in NDVI with altitudinal gradient and temperature in Qinling Area [J]. Resources Science, 2013, **35** (3): 618 - 626]
- [24] 王涛, 白红英. 秦岭山地植被 NDVI 对气候变化与人类活动的响应 [J]. 山地学报, 2017, **35** (6): 778 - 789. [WANG Tao, BAI Hongying. Variation of vegetation NDVI in response to climate changes and human activities in Qinling Mountains [J]. Mountain Research, 2017, **35** (6): 778 - 789] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000278
- [25] 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). DOI: 10.1029/2004GL021737
- [26] 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. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792
- [27] BERARDINO P, COSTANTINI M, FRANCESCHETTI G, et al. Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy) [J]. Engineering Geology, 2003, **68** (1): 31 - 51. DOI: 10.1016/S0013-7952(02)00197-7
- [28] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry [J]. Nature, 1993, **364** (6433): 138 - 142. DOI: 10.1038/364138a0
- [29] USAI S, KLEES R. SAR interferometry on a very long time scale: a study of the interferometric characteristics of man-made features [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, **37** (4): 2118 - 2123. DOI: 10.1109/36.774730

## InSAR-Based Monitoring and Identification of Potential Landslides in Lueyang County, the Southern Qinling Mountains, China

SU Xiaojun<sup>1a,2</sup>, ZHANG Yi<sup>1b,2\*</sup>, JIA Jun<sup>3</sup>, LIANG Yiwen<sup>1b,2</sup>,  
LI Yuanxi<sup>1b,2</sup>, MENG Xingmin<sup>1b,2,4</sup>

(1. a. College of Earth and Environmental Sciences, b. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Technology & Innovation Centre for Environmental Geology and Geohazards Prevention, Lanzhou 730000, China;

3. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China;

4. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The Qinling mountains has been severely haunted by geohazards, such as landslides, debris flows etc. Due to the joint geo-environmental effects of neo-tectonic movement, human activities, and climate change in the Qinling mountains, mechanism interpretation and their earlier identification of landslides had been challenging field investigators, particularly for underlying geohazards, whose occurrence state are characterized by high elevation

difference, steep slope, and dense vegetation coverage. There is an urgent need to develop a practical detecting technology for determination of landslide potentials in steep mountain areas covered by dense vegetation. In this study, multiple InSAR technologies (PS-InSAR, SBAS-InSAR, and D-InSAR) and two SAR datasets (Sentinel-1A and Alos-2) were introduced into an improved procedure to solve the technical problem created by a single InSAR approach, which is only applicable to an area with little vegetation cover. The area with an area of 110 km<sup>2</sup> in the vicinity of Chengguan district, Lueyang county, China was targeted as case study. In this procedure, ground deformation measurement, field monitoring and optical image interpretation were calibrated and analyzed, and 52 underlying landslides were delineated in the study area. The achievements are concluded: (1) The combined use of D-InSAR and L band SAR data facilitated the recognition of underlying landslides at a regional scale in mountainous areas with dense vegetation coverage. The time-series InSAR technique and Sentinel-1A were great success in tracing the temporal deformation patterns of underlying landslides; (2) The active landslides in Lueyang county were classified into three types: loess landslides, colluvial landslides, and loess-rock landslides. Unstable slopes mainly consisted of steep weathered bedrock and artificial slopes with potential for rockfall, collapse, loess-slide and flowslide. The dataset of underlying landslides collected by present study can provide references for local authorities for disaster prevention and mitigation purpose. Our proposed procedure to underlying landslide early detection based on multiple InSAR technologies can provide a feasible technical guidance for geohazard control not only at some places of the Qinling Mountains but similar mountainous areas with dense vegetation cover.

**Key words:** the Qinling mountains; landslide; early-identification; InSAR; surface deformation