

引用格式: 郭瑞, 李素敏, 陈娅男, 等. 基于SBAS-InSAR的矿区采空区潜在滑坡综合识别方法[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(7): 1109-1120.  
[ Guo R, Li S M, Chen Y N, et al. A method based on SBAS-InSAR for comprehensive identification of potential landslide[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(7): 1109-1120. ] DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180630

# 基于SBAS-InSAR的矿区采空区潜在滑坡综合识别方法

郭 瑞<sup>1</sup>, 李素敏<sup>1,2,3\*</sup>, 陈娅男<sup>1</sup>, 袁利伟<sup>2,3,4</sup>

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 云南省高校高原山区空间信息测绘技术应用工程研究中心, 昆明 650093; 3. 中国有色金属工业协会智慧矿山地理空间信息集成创新重点实验室, 昆明 650093; 4. 昆明理工大学 公共安全与应急管理学院, 昆明 650093

## A Method based on SBAS-InSAR for Comprehensive Identification of Potential Goaf Landslide

GUO Rui<sup>1</sup>, LI Sumin<sup>1,2,3\*</sup>, CHEN Ya'nan<sup>1</sup>, YUAN Liwei<sup>2,3,4</sup>

1. Kunming University of Science and technology, School of land and resources engineering, Kunming 650093, China; 2. Surveying and Mapping Geo-Informatics Technology Research Center on Plateau Mountains of Yunnan Higher Education, Kunming 650093, China; 3. Key Laboratory of Intelligent Mine Geospatial Information Integration and Innovation, Key Laboratory of China Nonferrous Metals Industry Association, Kunming 650093, China; 4. Kunming University of Science and technology, School of Public Safety and emergency management, Kunming 650093, China

**Abstract:** Traditional methods for monitoring goaf landslides cost manpower and material resources, while optical remote sensing is difficult for quantitatively identifying potential landslides. This paper used InSAR to monitor the slopes of a mountane area in Kafang Town of Yunnan Province that is affected by goafs. To date, there have been some methods for identifying the occurrence of (potential) landslides, but most of them are based on the line-of-sight (LOS) direction deformation or slope direction that is converted from the LOS direction. Yet, when landslide is monitored based on the LOS direction, the actual deformation trend of the landslide cannot be captured. The deformation based on the slope direction is limited by the different slopes of mountains during the conversion process, and cannot reflect the specific landslide deformation. In this context, this paper proposed a new method that integrated the ground monitoring data of SBAS-InSAR, slope, and aspect. The deformation rate of LOS was obtained by SBAS-InSAR, and then it was converted into the vertical deformation rate. Based on the SRTM DEM data of 30 m resolution in the study area, the GIS analysis tool was used to generate the slope and aspect maps. Combined with the satellite parameters of Sentinel-1A, the radar visibility of the study area was partitioned to obtain effective observation values. The slope and aspect were re-extracted to detect areas where landslide is likely to occur, and then they were integrated into the vertical deformation rate to identify potential landslides. The identified potential landslide areas were compared with historical records to evaluate the accuracy of our method. The result showed that the surrounding areas of

收稿日期: 2018-12-04; 修回日期: 2019-03-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161062、41861054)。[ **Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41161062, 41861051. ]

作者简介: 郭 瑞(1993-), 男, 河南洛阳人, 硕士生, 研究方向为InSAR在变形监测及防灾减灾中的应用。E-mail: grzte@qq.com

\*通讯作者: 李素敏(1977-), 女, 河南漯河人, 博士, 研究生导师, 研究方向为高原山区InSAR数据处理及应用。

E-mail: 153064487@qq.com

Kafang town were notably affected by goafs, and that the vertical deformation rate of most areas was more than 10 mm/a. With the proposed method, we found that 16 of the 21 historical landslide points in the study area were identified as potential landslides while 5 were not identified (but also located in the deformation region). We conclude that our proposed method for identifying potential landslides was highly accurate and feasible. This study provides a way to detect potential landslides near the goafs, by determining whether mountain slopes are in a potential and inconspicuous sliding state or not, and accordingly, helps provide early warnings of landslide disasters.

**Key words:** SBAS-InSAR; goaf; potential landslide; slop; slop direction; identification method; Kafang Town, Gejiu City, Yunnan Province

**\*Corresponding author:** LI Sumin, E-mail: 153064487@qq.com

**摘要:** 针对位于山区且受大量采空区影响的边坡,利用传统测量方法监测耗费人力、物力且光学遥感难以定量识别其是否为潜在滑坡的问题,本文提出一种融合研究区小基线集(SBAS-InSAR)地表监测数据、坡度及坡向的识别方法。通过SBAS-InSAR技术获得研究区地表雷达视线(LOS)方向形变速率,将其转化为垂直方向形变速率,并根据研究区DEM建立坡度及坡向分析图,根据不同山体的坡度、坡向找到易发生滑坡的区域,融入该区域垂直方向的时序形变速率,对其进行滑坡识别。实验表明:卡房镇周边受采空区的影响较大,多数区域垂直方向年形变速率大于10 mm/a;通过本文方法对研究区潜在滑坡进行识别,发现在研究区的21处历史滑坡点中,有16处被识别为潜在滑坡,5处未被识别但也位于发生形变的区域内,表明本文方法对潜在滑坡的识别精度高,具有可行性。该研究为识别采空附近的潜在滑坡提供了一种新的思路,可以有效识别采空区附近山体边坡是否处于潜在的、不明显的滑动状态,对滑坡灾害具有预警作用。

**关键词:** SBAS-InSAR; 采空区; 潜在滑坡; 坡度; 坡向; 识别方法; 云南省个旧市卡房镇

## 1 引言

云南省个旧市地处滇东高原地区,矿产资源丰富,是驰名中外的“锡都”,开采历史超过2000年,该地区由于长时间采矿造成的采空区、滑坡、山体开裂和石漠化等问题日趋严重。采空区会导致其上方地表岩石、土体应力失衡,引起地面塌陷甚至山体滑坡和崩塌。SBAS-InSAR技术可以很好地对此类区域进行大面积、长时间序列的监测<sup>[1-8]</sup>。

近年来许多学者利用InSAR技术对滑坡识别做了大量研究。Wasowski等<sup>[9]</sup>在2014年就滑坡InSAR监测方面已经完成的出色工作进行了详细的归纳并对未来进行了展望,表达了对具有中高分辨率和短重访周期的Sentinel数据在滑坡监测中应用的期待。廖明生等<sup>[10]</sup>利用高分辨率SAR数据以三峡库区滑坡为研究区,成功监测到滑坡所发生的时间段、地点以及形变,验证了高分辨率雷达数据InSAR技术进行滑坡监测的有效性。Cascini等<sup>[11]</sup>利用SAR系统采集的数据建立3D地形模型,可用于协助区域尺度调查,通过对阿尔卑斯山滑坡研究表明,时序SAR技术可以基于不同运动速率对特征区域进行识别,并可对大型缓慢滑坡进行危险区分。Dong等<sup>[12]</sup>采用时序InSAR技术对位于四川省的甲

居滑坡进行监测,验证了InSAR技术在地形复杂的山区具有较高的形变监测精度。刘筱怡等<sup>[13]</sup>基于SBAS-InSAR,对鲜水河断裂道孚至炉霍段的活动速率进行分析计算,获得该区域2007-2011年的如东兴滑坡时间序列形变特征。徐建军<sup>[14]</sup>通过对老采空区上方滑坡进行勘察,应用物探法和钻探验证了采空区和滑动面的位置及范围,论证了采空区是引起滑坡的主要因素。虽然采空区对其上方边坡的稳定性会造成一定影响,但滑坡事故的发生是多种因素耦合下的结果。在不考虑外界因素情况下,采空区上方边坡的坡度及坡向是导致其自身发育为滑坡的重要因素<sup>[15-17]</sup>。国内外学者通过大量研究,发现位于不同地区的山体边坡,年形变速率在10 mm/a以上容易形成滑坡且滑坡多发生于坡度大于20°的区域。不同的坡向发生滑坡的可能性有明显差异,阴坡(0~64.5°,247.5~360.0°)发生滑坡的频率明显低于阳坡(64.5~247.5°)<sup>[18-21]</sup>。

现有研究虽然可以在一定程度上识别已发生的滑坡和潜在滑坡区域,但这些方法大多是基于LOS视线方向形变或是通过将LOS视线方向形变转换为斜坡方向形变进行研究分析。基于LOS视线方向形变对滑坡进行判断,虽然可以一定程度上识别出滑坡发生的时间与地理位置,但LOS方向与



地表及山体边坡存在一定夹角,不能直观反映出研究区域内的垂直及斜坡方向变形程度,也无法反映出发生滑坡的山体在监测时间内的真实时序形变量,并且难以识别出滑坡发生前后具体的形变趋势;基于斜坡方向的形变对滑坡进行识别,虽然可以直观描述滑坡的形变程度,但是该方法在基于研究区LOS视线方向的形变量进行斜坡方向形变量的转换过程中,受限于研究区不同山体的坡度差异,当雷达视线与斜坡的夹角(视坡夹角)接近 $90^\circ$ 时,斜坡方向形变量趋于无穷大,为了避免出现此种情况,需要对视坡夹角进行阈值设定。由于研究区不同山体之间的实际坡度与坡向区别较大,如果设定统一阈值则无法具体体现出发生在不同山体滑坡区域的真实形变程度。然而,目前可以利用InSAR技术获取研究区的垂直形变场,基于垂直形变对研究区不同山体边坡进行分析,既可以直观了解在某一时段内其发生形变的具体趋势,又可以明确其形变过程中所产生的位移量。基于此,本文通过卫星参数及研究区地形参数进行雷达可视区划分,并结合SBAS-InSAR技术反演得到研究区的垂直形变场,进一步获取有效观测区域,再结合不同山体的坡度、坡向进行综合分析,识别出研究区的潜在滑坡区域。

## 2 实验区概况、数据处理及研究方法

### 2.1 实验区概况

个旧市位于 $103^\circ08'E-103^\circ16'E$ 、 $23^\circ10'N-23^\circ$

$18'N$ ,地处滇东高原地区的滇东南岩溶盆地区东缘,地势东西高、南北低,海拔 $78\sim 2780\text{ m}$ ,地形起伏大,是滑坡等地质灾害的高发区,曾在历史上多次发生大规模滑坡事故,现今的矿区位置,如图1所示。曾在1975年6月19日及1996年7月22日发生过较大规模的滑坡,下滑土石方量分别达到 $18\text{万 m}^3$ 和 $10\text{万 m}^3$ ,造成17人死亡,13人受伤;2015年,途经个旧至元阳南沙公路路段(卡房镇所在的山谷沿线)发生大规模山体滑坡事故,导致道路中断。

该区域地下矿产资源丰富,分布着卡房分矿以及新建矿2个矿区(图2),2个矿区彼此相邻,位于卡房镇东南方的山体之上,卡房分矿的年开采矿量 $58\text{万 t}$ ,采用全面采矿法及有底部结构的分段采矿法。采厚 $3\sim 4\text{ m}$ ,长 $35\sim 50\text{ m}$ ,宽 $8\sim 20\text{ m}$ ,以 $1700\text{ m}$ 中段及 $1800\text{ m}$ 中段为开拓主中段。新建矿的年开采矿量 $14\text{万 t}$ ,采用全面采矿方法为主。采厚为 $1.5\sim 2\text{ m}$ ,开采标高为 $1450\sim 2000\text{ m}$ 之间, $1880\text{ m}$ 中段至 $1520\text{ m}$ 现为生产中段(图2)。长时间的地下开采形成的采空区,增加了其上方边坡滑坡的可能性。

本文选择的研究区位于个旧市卡房镇附近区域,卡房镇常住人口5万人。矿区位于卡房镇东部,如图1所示,研究区内其余村庄多分布于山体边坡周围,面临着周边山体受采空区影响而发育成滑坡的威胁,因此及早识别潜在滑坡区域,做到预警预报,可以有效防止意外的发生。

### 2.2 数据来源及处理

#### 2.2.1 数据来源

本文使用来自欧空局(European Space Agency,

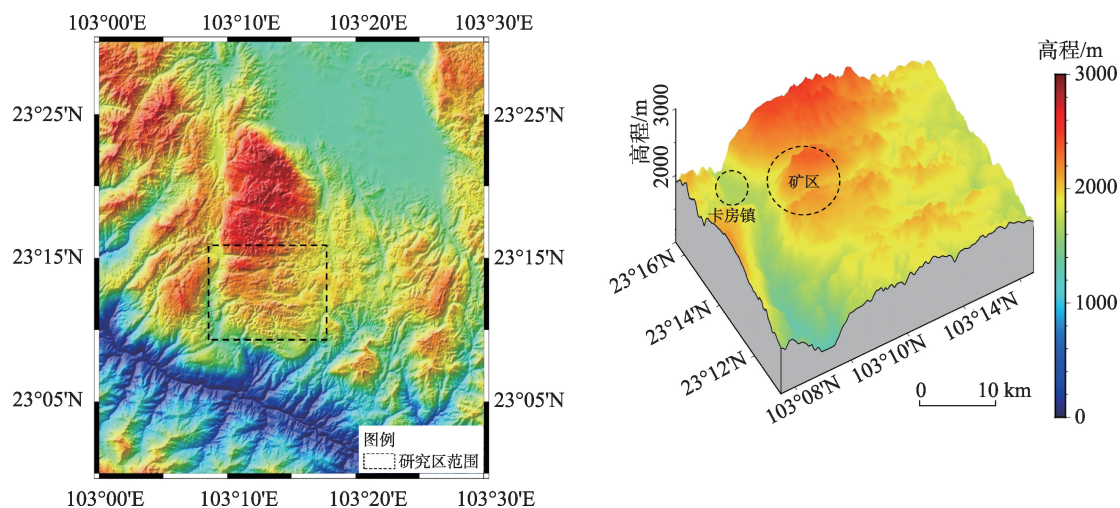


图1 个旧市地理位置

Fig. 1 Geographical location map of the study area

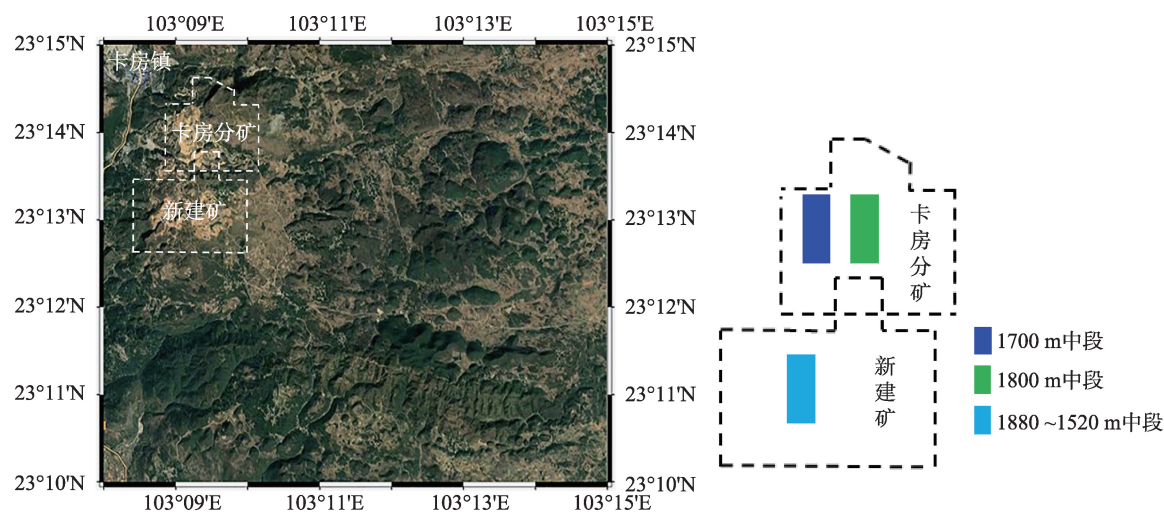


图2 个旧市矿区分布

Fig. 2 Distribution map of mining areas in the study area

ESA)2014年6月–2018年10月获取的44景 Sentinel-1A影像数据进行后续处理分析<sup>[22]</sup>,其详细参数见表1。本文所使用的数字高程模型(DEM)是由美国国家航空航天局(NASA)主导测量的STRM 30 m分辨率数据<sup>[23]</sup>。

2.2.2 数据处理

(1)SBAS技术的基本原理是基于若干幅较短时空基线的SAR影像对产生高相干性干涉图,通过

对干涉图进行多视处理降低相位噪声,提取高相干像元,然后利用奇异值分解即SVD方法将多个小基线集联合求解,获取最小范数下的最小二乘解,得到研究区垂直方向上的时序形变序列。具体处理流程如图3。

本文利用欧空局发布的对应精密轨道数据<sup>[24]</sup>(Precise Orbit Ephemerides, POD)和30 m分辨率的SRTM DEM进行影像轨道误差和地形相位校正。为了减少时间、空间失相关的影响,保证干涉图质量,将最大空间基线阈值和时间基线最大阈值设为5%和120 d,选择2015年10月23日影像为超级主影像,在此条件下自由组合成了126个干涉像对,如图4所示。

图5(a)是去除地形误差后的相位改正结果,由于研究区森林覆盖度较高,地形起伏大,其初步地形校正效果较差,故采用Delaunay MCF方法进行相位解缠减小植被等因素影响,为了得到最高空间

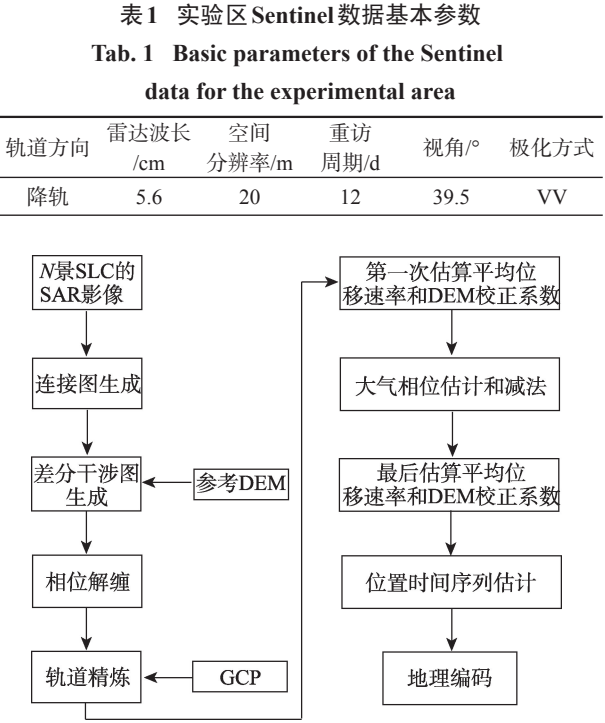


图3 SBAS处理流程

Fig. 3 SBAS Processing flowchart

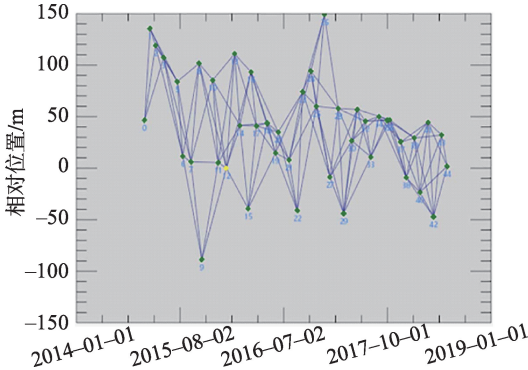


图4 数据集时空基线分布

Fig. 4 Spatiotemporal baseline distribution of the dataset



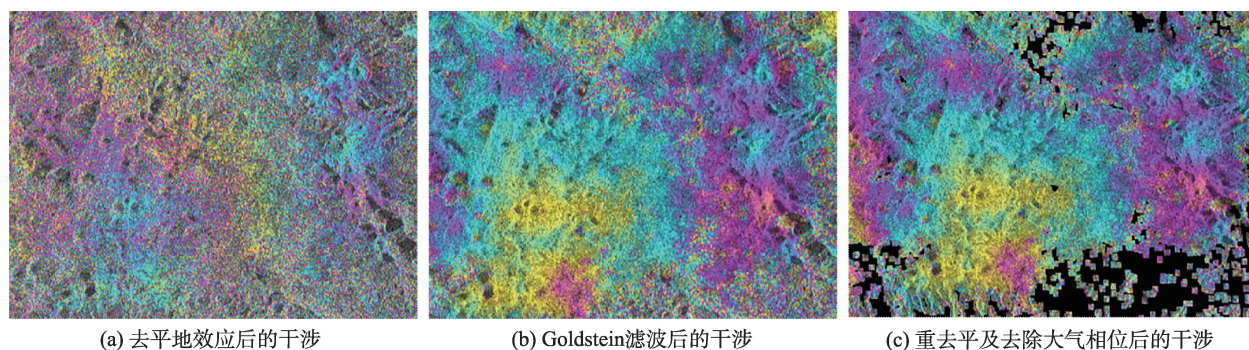


图5 研究区相位校正

Fig. 5 Study area phase correction

分辨率的 SAR 图像,应用多视和 Goldstein 滤波进行噪声去除,其中多视比为 1:4,得到滤波后的相位改正结果如图 5(b),可看出经滤波后减小了噪声及地形误差,对研究区相位改正效果明显;在解缠后的干涉图像上选取 60 个远离形变区相对稳定的点作为 GCP 点,进行估算和去除残余的恒定相位和解缠后还存在的相位坡道。利用稳健性最高的线性模型估算每一个像对的形变速率和残余相位并利用高通滤波和低通滤波对大气影响进行估计并去除大气相位,最终获取的形变相位改正结果如图 5(c),可以看出经过一系列的误差校正后研究区形变相位得到了进一步改正,去除大气相位等残余相位后的线性模型分析对形变相位已无明显改正,证明结算精度达到最优。但因研究区地形地貌因素对其影响较大,故获取的最终形变相位干涉图质量受到一定影响。

(2)借助 ArcGIS 的 3D 分析与空间分析,利用 SRTM 30 m 分辨率的 DEM 数据进行研究区内的坡度、坡向分析,并根据需求对坡度进行相关提取、对坡向进行重分类,以便于文中统计分析。

### 2.3 研究区雷达可视性分析

由于 SAR 采用侧视成像方式,即雷达波束是以一定的入射角照射地表,受地形起伏的影响,InSAR 技术在高山峡谷进行地表形变监测时受斜坡坡度的影响较大,当地形起伏较大时,SAR 影像常常会发生以下 3 类几何畸变,即:阴影、透视收缩、叠掩。根据 Sentinel 卫星几何参数(见 2.2 节)以及研究区 30 m 分辨率所获取的地形参数可得出本文所用降轨轨道卫星在研究区的可视性分区方式(表 2),并划分了相应的可视性区域(图 6)<sup>[25]</sup>。

Sentinel-1A 降轨影像在研究区内的可视性区域

分布如图 6 所示,可见区域约占 44%,低敏感区域约占 15%,不可见区域约占 41%。其中,可见区域以主要分布于西、南地区;不可见区域主要分布在东北地区。下一步将可见性分区后的结果结合光学影像以及 InSAR 监测结果进行进一步分析(详见 3.1 节)。

### 2.4 滑坡识别方法

本文对潜在滑坡的识别方法为(图 7):① 根据研究区 SRTM DEM 30 m 分辨率数据进行坡度、坡向提取,然后结合 Sentinel-1A 降轨卫星参数,对研究区进行雷达可视性分区;② 结合研究区的 SBAS 结果获取有效形变观测值;③ 利用 GIS 分析工具提取年形变速率大于阈值的区域,然后与 3.2 节中获

表 2 SAR 影像可见性分区

Tab. 2 Visibility partition of the SAR imagery

可见性分区	坡向	说明
不可见	东、东南、东北	坡度<39.5°时发生透视收缩,坡度>39.5°时发生叠掩
可见	西、西南、西北 坡度<50.5°	坡度>50.5°时发生阴影
低敏感性	南、北	指对南、北向形变监测能力较低

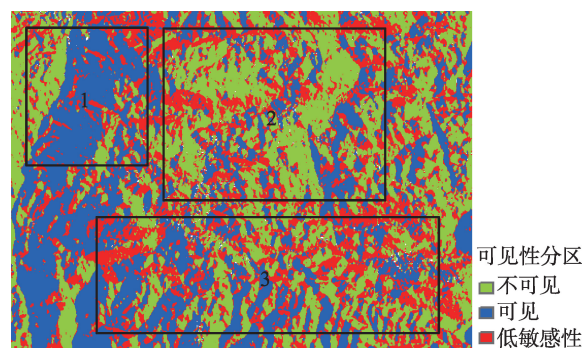


图6 Sentinel降轨影像可视性分区

Fig. 6 Visibility partition map of the Sentinel descending imagery

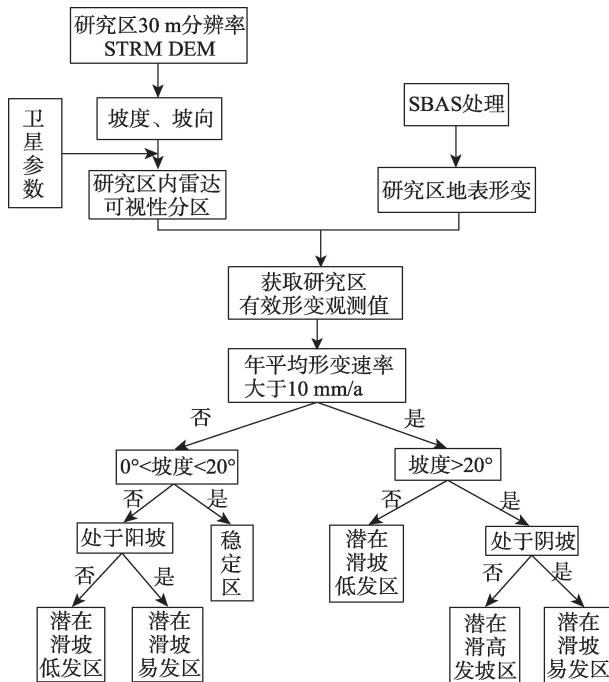


图7 SBAS-InSAR 识别潜在滑坡技术流程

Fig. 7 Flowchart of the potential landslide identification by SBAS-InSAR

得的研究区经过重分类后的坡度、坡向图层进行对比分析,确定研究区内的不同形变区域是否处于形变量与坡度、坡向均处于易发生滑坡的阈值范围内,最后对三者进行统一识别分析,判别出潜在滑坡区域,并与研究区的历史滑坡点进行对比,验证识别精度。

阈值判别依据为:根据国内外众多学者针对滑

坡事故做出的研究<sup>[1,17,21,25-27]</sup>,发现众多滑坡(如中路滑坡、红军桥滑坡、白岬山滑坡等)发生的位移速率均大于10 mm/a,并且根据意大利IFFI工程所改进的滑坡活动性分级体系<sup>[31]</sup>,可知最低等级的滑坡发生时是沿斜坡速率在16 mm/a左右。基于前人的研究成果及本实验区的基本情况,做出如下速率阈值判定即垂直方向年形变速率大于10 mm/a的区域易发生滑坡事故。对于坡度、坡向的阈值判别指标,本文选在将坡度大于20°,处于阳坡的区域认定为滑坡高发区(详见3.2节)。

### 3 结果及分析

#### 3.1 实验区变形监测结果分析

基于SBAS-InSAR分析技术,获取了研究区2014–2018年的地表垂直方向的形变速率结果,如图8所示。从图中可以看出整个研究区处于不均匀形变状态,形变严重的区域主要分布在矿区所处的区域1,其年平均形变速率在-70~10 mm/a范围内浮动,发生最明显形变的位置位于矿区开采处,年平均形变速率达到-70 mm/a;地形起伏较大的区域3整体形变程度也比较明显,其年平均形变速率在-30~0 mm/a之间。研究区中部的区域2较为稳定,大多数区域形变速率在0~10 mm/a,少部分区域形变速率达15 mm/a左右。

结合研究区可见性分区结果(图6)、光学影像(图2)及实地调查,发现研究区西南角地区植被覆

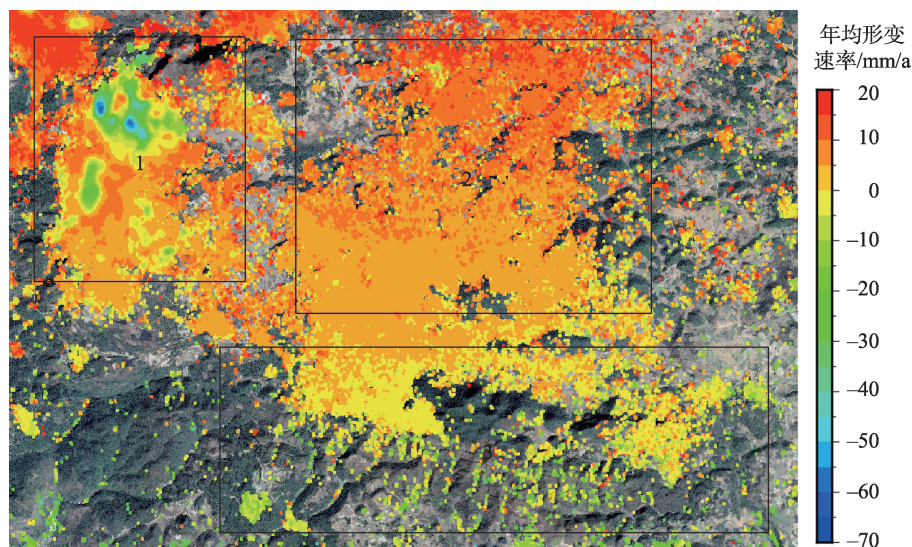


图8 个旧市矿区2014–2018年垂直方向年平均形变速率

Fig. 8 Average annual deformation rate of the vertical direction in the study area during 2014–2018



盖率极高,常年覆盖茂密植被,因此该区域虽为可见区,但由于极高的植被覆盖率,会导致失相干严重,通过图8也可看出该处区域极少被监测出有效形变值;区域2的植被覆盖率较高,但较多不可见区处于该地区,然而通过InSAR监测结果却发现,该区域大多地区被监测出处于抬升状态,这与其处于不可见区相矛盾,结合该区域相对较高的植被覆盖率可推断,此处监测出的大面积抬升主要是受季节性植被生长所影响。因此为了获取研究区内的有效观测形变点位,结合研究区雷达可视性分区结果以及对受植被因素影响严重的区域,如区域2、区域3北部、剔除抬升点位。剔除植被影响因素后的研究区时序形变速率如图9所示,最终得到2个有效观测区域,分别为区域1和区域3,其垂直形变速率基本分布在 $-70\sim 0$  mm/a之间。

由上述分析可知,研究区内的形变区域呈现不均匀分布特征,造成该现象的因素主要是人类活动因素(矿区开采)及差异化的地理环境因素(坡度、坡向、植被覆盖率等)。形变较大的区域分布在区域1及区域3。区域3所处位置,山体众多、地形起伏大但植被覆盖率较小,基本不受采空区的影响,但其整体形变量却较大,由此可以看出,受地形地貌等地理环境因素的影响,其山体边坡的稳定性会明显低于区域1,发生滑坡的可能性会相对较大。

结合图1(b)与图10可知,矿区朝向卡房镇一侧山体坡度较大,受自身地形地貌因素的影响易发生形变。从2014年11月到2018年6月约3年半时

间内,研究区垂直方向累计形变量最大达250 mm,且形变面积较大。2015年11月28日之前研究区虽总体呈现沉降趋势,但形变程度较小,在此之后,研究区的形变开始趋于明显,从图中可以明显看出矿区所在位置,以及其沉降漏斗的发育情况。从2015起沉降漏斗已经开始发育,到2015年11月28日,沉降漏斗已初具规模,沉降量达100 mm。到2018年6月矿区位置沉降中心的沉降量达200~250 mm。通过其时序形变场可以了解到,研究区矿区周边山体也发生了明显的形变,在2015~2018年沉降漏斗发育过程中,其周边山体的形变从2014年11月的不足 $-25$  mm的形变量,慢慢发育至 $-100\sim -75$  mm的形变量,由此可以看出长期的人为开采活动,进一步导致该区域长期处于较大的形变状态之中,在矿区开采及其自身地形地貌的影响下最终导致该矿区及其周边山体出现较大的形变结果。

### 3.2 实验区坡度、坡向分析

本次研究借助GIS的3D分析工具,提取研究区的坡度及坡向如图11、图12,利用其空间分析工具,对本文需要的坡度及坡向进行提取和重分类,如图13、图14。

坡度对滑坡的影响显著,对于大多数山坡,滑坡发育的可能性会随着坡度的增大而增大<sup>[16]</sup>。在不同的地质条件下,滑坡多发于坡度大于 $20^\circ$ 的区域<sup>[29]</sup>。由于本研究区地形起伏大,山体坡度普遍较高,属于传统意义上的滑坡高发区,因此本文着重

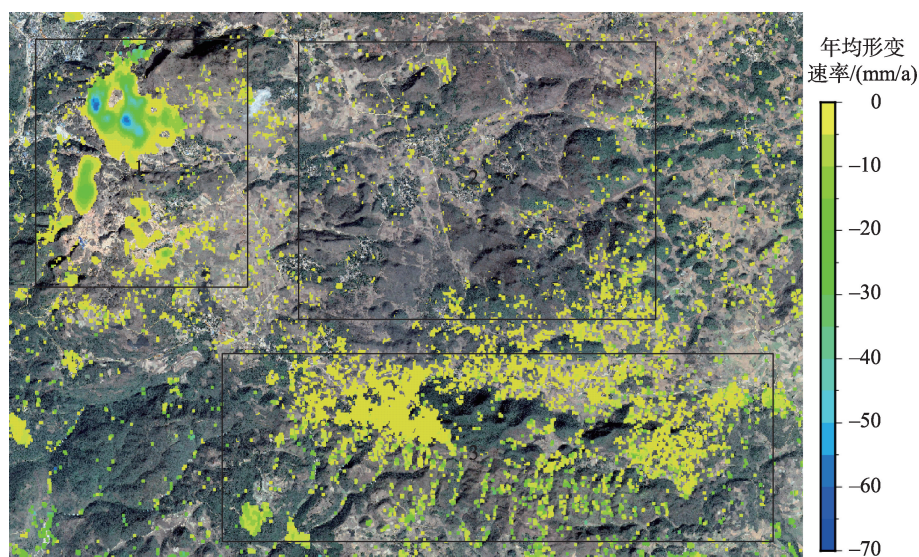


图9 去除植被因素影响后的研究区形变速率

Fig. 9 Deformation rate diagram of the study area after removing the influence of vegetation factors

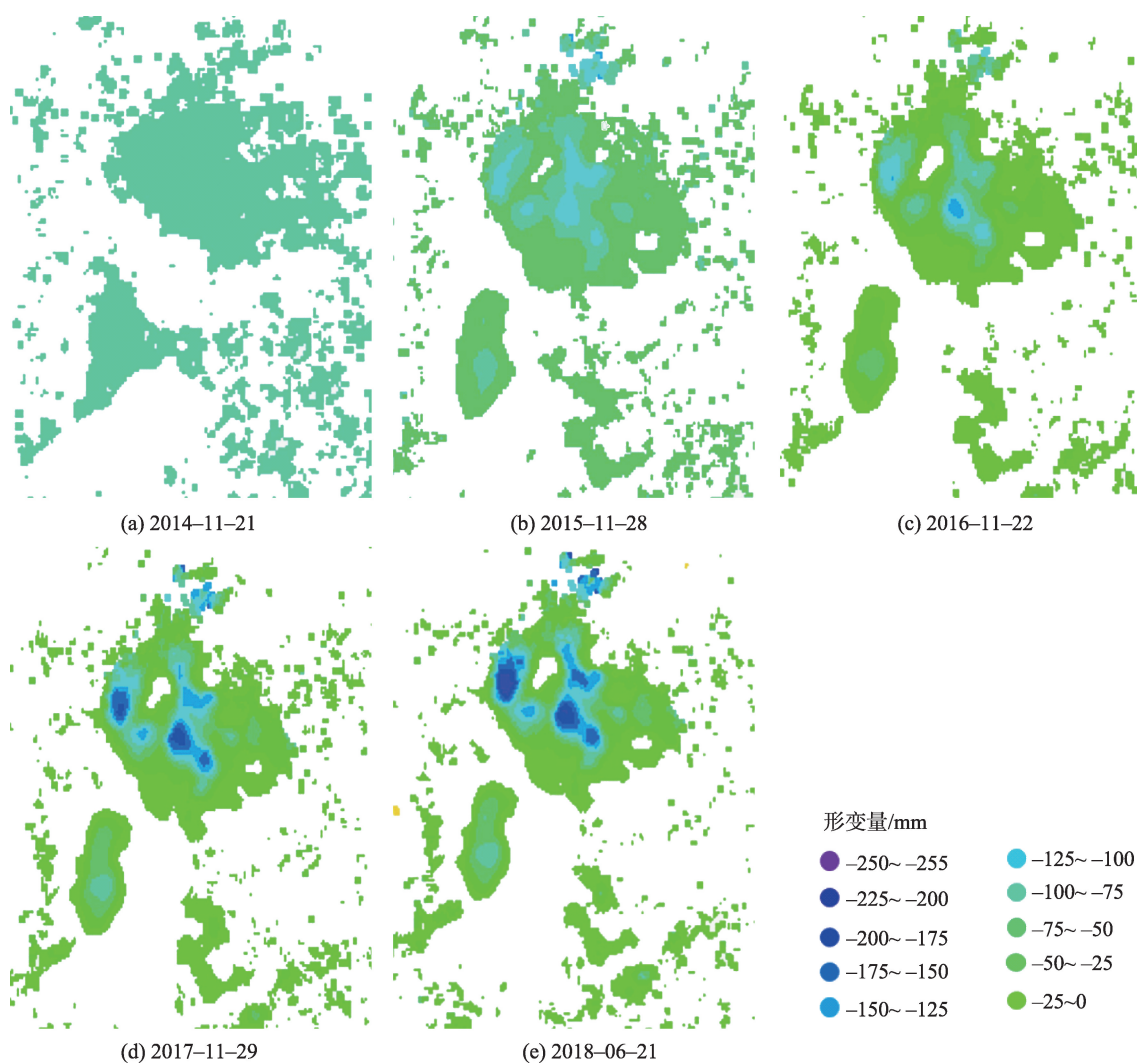


图 10 个旧市矿区及其周边地表时序沉降场

Fig. 10 Timing settlement field of the mining areas and surrounding areas

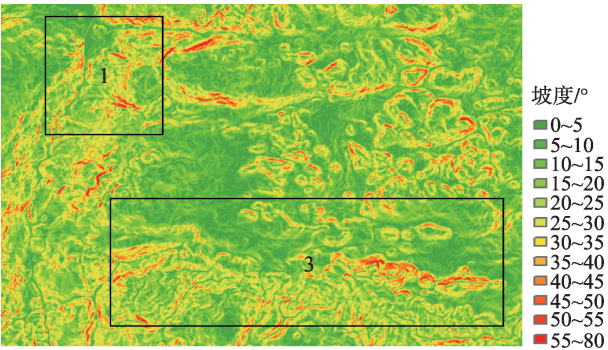


图 11 2000 年个旧市矿区坡度

Fig. 11 Slope map of the study area

对坡度进行分析,提取研究区坡度大于 $20^{\circ}$ 的区域进行重点分析。

由坡度图可知,研究区坡度分布在 $0^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 之间,其中较多区域的坡度为 $0\sim 50^{\circ}$ ,极少量区域为 $50\sim$

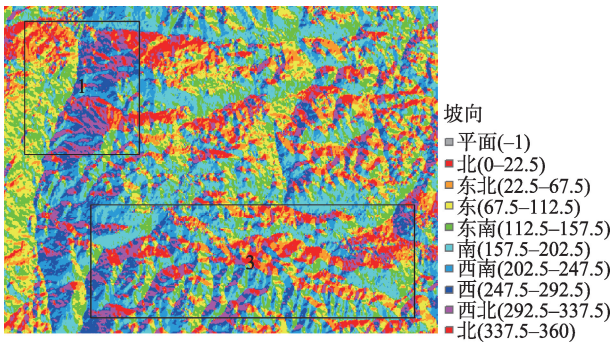


图 12 2000 年个旧市矿区坡向

Fig. 12 Slope direction map of the study area

$80^{\circ}$ 。卡房镇和矿区均位于研究区西北方(区域1),该区域整体坡度较大,处于 $20\sim 50^{\circ}$ 之间,属于滑坡高发区,并且该地区由于地下开采形成了大量的采空区,由此可知该区域发生滑坡的可能性相对较大。



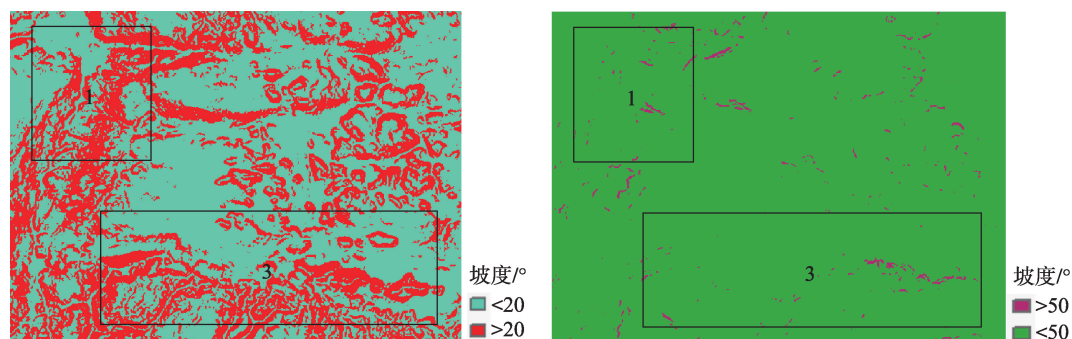


图13 处理的个旧市矿区坡度

Fig. 13 Processed slope map of the study area

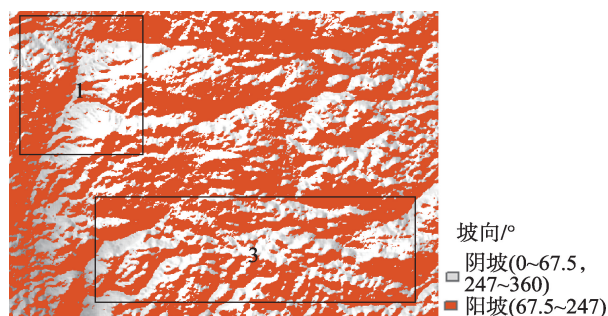


图14 重分类后的个旧市矿区坡向图

Fig. 14 Reclassified slope map of the study area

坡向也是导致山体滑坡的重要因素,阳坡所发生滑坡的概率明显高于阴坡<sup>[30-31]</sup>。主要是由于坡向对山地生态有着较大的影响,其直接影响太阳辐射、日照时数和水汽分布,使山体不同坡向的植被、侵蚀和风化作用等产生规律性差异,而这些差异会导致不同坡向的山体发生滑坡的分布差别明显。如图13所示,结合研究区的有效观测区域可知,在有效观测区域内的阳坡(67.5~247.5°)分布较多,阴坡(0~67.5°, 247.5~360°)分布较少。其中阳坡(67.5~247.5°)区域的日照总量大、接受太阳辐射较多、水分含量较少、土壤比较干旱,植被覆盖率低,属于滑坡高发区;阴坡的太阳辐射较少、土壤比较湿润、温度相对较低,因此该区域植被生长情况较好,覆盖率相对较高,属于滑坡低发区。从图14中可以看出,矿区及卡房镇处于区域1,并且矿区朝向卡房镇的一侧整体处于阳坡区域,发生滑坡的概率较大。

通过对研究区垂直方向的年平均形变速率、坡度及坡向分析,可知:由于该区域受矿区地下开采影响,整体年平均形变速率较大,基于众多滑坡实例可知,年形变速率在0 mm/a左右的区域发生滑坡的概率明显低于年形变率大于10 mm/a的区域;研

究区的有效观测区域内山体坡度处于25°~50°之间且大多数山体坡向为阳坡,从山体边坡自身因素来看,此区域属于滑坡高发区。因此,有必要综合该区域垂直方向的形变速率、坡度及坡向分析山体是否处于滑坡或潜在滑坡状态。

## 4 SBAS-InSAR 滑坡识别结果及精度验证

通过中国地质调查局2015年发布的中国滑坡分布图<sup>[32]</sup>结合野外实地调查获取了位于研究区的21个历史滑坡区域。根据本文识别方法提取出如图15所示的11个区域,详情见表3。将识别出的研究区潜在滑坡区域与历史滑坡区进行对比,验证识别精度。其中1~10为识别出的滑坡区域,共有16处潜在滑坡区;11区域为未识别出的滑坡区域,含有5处潜在滑坡区。

由图15可知,对于识别为潜在滑坡区的位置,大多位于研究区坡度和形变程度较大的阳坡区域。虽然研究区区域11有5处历史滑坡区未被识别,但未能识别出的5处历史滑坡区,也均位于研究区的形变区域。未能识别的主要原因是:该区域大面积处于雷达不可见及不敏感区域,有效形变点位较少。且该区域植被覆盖率高,为了避免受大面积植被因素的影响,获取有效识别滑坡区域的形变点位,对处于区域11受植被因素影响而出现抬升的形变点位进行剔除,进一步减少了该区域的有效时序形变点位提取量,未能对其进行准确识别。

## 5 结论与展望

目前国内外大多数利用MT-InSAR进行滑坡识

表3 研究区滑坡识别  
Tab. 3 Landslide identification in the study area

序号	年平均垂直形变速率/(mm/a)	坡度/°	坡向	滑坡识别
1	<10	35	阳坡	易发区
2	30	25	阳坡	高发区
3	50	<20	阴坡	低发区
4	45	20	阳坡	易发区
5	25	20	阳坡	易发区
6	<10	30	阴坡	低发区
7	<10	<20	阳坡	稳定区
8	<10	25	阳坡	易发区
9	30	<20	阳坡	易发区
10	0~30	20~50	阴坡和阳坡	易发区和高发区
11	<10	0~20	阴坡和阳坡	未识别

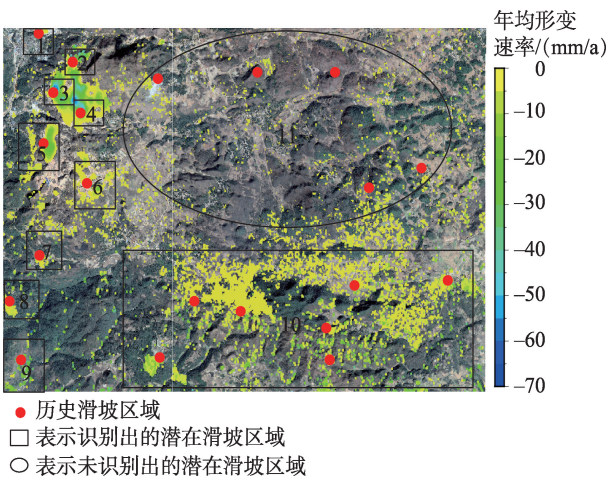


图 15 2014-2018 年潜在滑坡区域与历史滑坡区域空间对比  
Fig. 15 Spatial comparison of potential landslide areas and historical landslide areas during 2014-2018

别的研究中,仅顾及山体边坡形变量这一单一数据,难以识别仅获取少量 InSAR 形变点位的滑坡,且易于忽略形变量较小的潜在滑坡。由于复杂山区中受卫星几何畸变影响的区域较多,更进一步降低了可探测的形变区域面积,虽然通过使用具有较大入射角的卫星如 Sentinel、Alos 升、降轨数据共同识别滑坡,可以在一定程度上扩大有效形变监测区域,但仍然难以解决位于复杂山区的大多数山体边坡仅能被监测出少量形变值的问题。因此,本文在顾及 SBAS-InSAR 反演的地表形变信息基础上,结合地形因子对位于复杂山区的个旧矿区进行潜在滑坡的综合识别分析,在一定程度上改善了上述问题所带来的影响,高精度的识别结果表明该方法不仅可以识别具有较大形变量的滑坡体,而且可以通过结合地形因子有效识别出具有较少 InSAR 监测

点且处于较小形变量的潜在滑坡区域。研究结果如下:

(1)区域 1 受采空区的影响较大,其垂直方向年形变速率在 $-70 \sim 0$  mm/a 之间。区域 3 受复杂地形因素的影响,其垂直方向年形变速率在 $-30 \sim 0$  mm/a 之间。

(2)对比 1、3 区域地表形变情况可知,矿区开采对研究区周边山体形变有显著影响。

(3)结合本文滑坡识别方法,共识别出研究区内 10 处潜在滑坡区域(含 16 处滑坡点),均位于研究区的历史滑坡区域,有 1 处滑坡区(含 5 处滑坡点)未能识别。

通过本文研究可知,在使用 MTI 技术对区域滑坡进行识别时,不仅需要考虑边坡的形变量,还应结合地形因子进行综合分析以准确判别潜在滑坡。本文方法对处于滑动不明显的潜在滑坡的识别应用中,具有较高可行性且识别精度高,有助于及早识别研究区内的潜在滑坡区。下一步将采用多源、多轨道卫星数据以及多种 MTI 处理方法获取复杂山区的地表形变情况,进行大范围的滑坡识别。在技术流程中将着重改进在复杂山区中 LOS 方向的转换问题。针对植被覆盖率高的地区,进行实地勘察,加强对该区域潜在滑坡的识别,起到对滑坡的预警作用,最大程度减少区域滑坡事故发生所导致的损失。

参考文献(References):  
[1] 陈玺. SBAS-InSAR 技术在秦州区地表形变监测与滑坡敏感性评价中的应用研究[D]. 兰州:兰州大学,2018.  
[Chen X, Detecting ground deformation and assessing



- landslide susceptibility in Qinzhou district based on SBAS-InSAR technique[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. ]
- [ 2 ] 康亚,赵超英,张勤,等.InSAR滑坡探测技术研究——以金沙江乌东德水电站段为例[J].大地测量与地球动力学,2018,38(10):1053-1057. [ Kang Y, Zhao C Y, Zhang Q, et al. Research on the InSAR technique of landslide detection:A case study of wudongde hydropower station section,Jinshajiang[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018,38(10):1053-1057. ]
- [ 3 ] 康亚. InSAR技术在西南山区滑坡探测与监测的应用[D].西安:长安大学,2016. [ Kang Y. Landslide detection and monitoring over southwestern mountainous area with InSAR[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. ]
- [ 4 ] 王桂杰,谢谟文,邱骋. D-INSAR技术在大范围滑坡监测中的应用[J].岩土力学,2010,31(4):1337-1344. [ Wang G J, Xie M W, Qiu P. Application of D-INSAR technique to landslide monitoring[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4):1337-1344. ]
- [ 5 ] Colesanti C, Ferretti A, Prati C, et al. Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers technique[J]. Engineering Geology, 2003,68(s1-2):3-14.
- [ 6 ] 涂鹏飞,岑仲阳,湛华.应用重轨星载InSAR技术监测三峡库区滑坡形变探讨[J].遥感技术与应用,2010,25(6):886-890. [ Tu P F, Qin Z Y, Chen H. Monitoring landslides deformation in three gorges reservoir area by using the repeat-pass spaceborne InSAR[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010,25(6):886-890. ]
- [ 7 ] Berger M, Moreno J, Johannessen J A, et al. ESA's sentinel missions in support of Earth system science[J]. Remote Sensing Environment, 2012,120:84-90
- [ 8 ] 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
- [ 9 ] Wasowski, Bovenga F. Investigating landslides and unstable slopes with satellite multi temporal interferometry: Current issues and future perspectives[J]. Engineering Geology, 2014,174:103-138
- [ 10 ] 廖明生,唐婧,王腾,等.高分辨率SAR数据在三峡库区滑坡监测中的应用[J].中国科学:地球科学,2012,42(2):217-229. [ Liao M S, Tang Q, Wang T, et al. Landslide monitoring with high-resolution SAR data in the Three Gorges region[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2012,42(2):217-229. ]
- [ 11 ] Cascini L, Fornaro G, Peduto D. Advanced low - and full-resolution D-InSAR map generate-on for slow-moving landslide analysis at different scales[J]. Engineering Geology, 2010,112(1-4):29-42.
- [ 12 ] Dong J, Zhang L, Tang M, 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. ]
- [ 13 ] 刘筱怡,杨志华,郭长宝.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(5):445-977. [ Liu X Y, Yang Z H, Guo C B. Study of slow-moving landslide characteristics based on the SBAS-InSAR in the Xianshuihe fault zone[J]. Geoscience, 2017,31(5):445-977. ]
- [ 14 ] 徐建军.煤矿老采空区滑坡勘查与机理分析——以山西清徐李家楼滑坡为例[J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(4):25-29. [ Xu J J. Survey and mechanism analysis of landslide in old coal mine goaf: An example of Liji-alou landslide in Qingxu, Shanxi[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015,26(4):25-29. ]
- [ 15 ] 樊晓一,张友谊,杨建荣.汶川地震滑坡发育特征及其影响因素[J].自然灾害学报,2012,21(1):128-134. [ Fan X Y, Zhang Y Y, Yang J R. Developmental characteristics and influence factors of landslides in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Natural Disasters, 2012,21(1):128-134. ]
- [ 16 ] 曹洪洋,郝东恒,白聚波.区域滑坡灾害地形地貌因子敏感性分析研究[J].中国安全科学学报,2011,21(11):3-7. [ Cao H Y, Hao D H, Bai J B. Sensitivity analysis of topographic and geomorphologic factors to regional landslides [J]. China Safety Science Journal, 2011,21(11):3-7. ]
- [ 17 ] 苏巧梅,赵尚民,郭建立.霍西煤矿区地表滑坡灾害敏感性数值建模与等级划分[J].地球信息科学学报,2017,19(12):1613-1622. [ Su Q M, Zhao S M, Guo J L. Numerical modeling and degree division to landslide susceptibility in the ground surface of Huoxi coal mine area[J]. Journal of Geo-information Science, 2017,19(12):1613-1622. ]
- [ 18 ] 聂兵其.基于InSAR的滑坡形变探测及隐患识别研究——以丹巴县城区为例[D].成都:成都理工大学,2018. [ Nie B Q. Landslide deformation detection and identification based on InSAR technology: A case of Danba county[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. ]
- [ 19 ] 熊海仙,黄光庆,宫清华.数字地形分析在滑坡研究中的应用综述[J].热带地理,2015,35(1):139-146. [ Xiong H L, Huang G Q, Gong Q H. A review on application of digital terrain analysis in landslide researches[J]. Tropical Geography, 2015,35(1):139-146. ]
- [ 20 ] 杨城,林广发,张明锋,等.基于DEM的福建省土质滑坡敏感性评价[J].地球信息科学学报,2016,18(12):1624-1633. [ Yang C, Lin G F, Zhang M F, et al. Soil landslide susceptibility assessment based on DEM[J]. Journal of Geo-Information Science, 2016,18(12):1624-1633. ]

- [21] 范景辉,邱阔天,夏耶.三峡库区范家坪滑坡地表形变InSAR监测与综合分析[J].地质通报,2017,36(9):1665-1673. [ Fan J H, Qiu K T, Xia Y. InSAR monitoring and synthetic and of the surface deformation of Fanjiaping landslide in the Three Gorges Reservoir area[J]. Geological Bulletin of China, 2017,36(9):1665-1673. ]
- [22] Copernicus open access hub[EB/OL]. <https://scihub.copernicus.eu/>.
- [23] Global data explorer[EB/OL]. <https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>.
- [24] Sentinel-1 quality control[EB/OL]. <https://qc.sentinel1.eo.esa.int/>.
- [25] 温浩.基于MTI技术的岷江流域滑坡识别研究[D].南京:南京师范大学,2015. [ Wen H. Study on landslide recognition in Minjiang Basin based on MTI technology[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015 ]
- [26] 张诗茹,蒋建军,缪亚敏.基于SBAS技术的岷江流域潜在滑坡识别[J].山地学报,2018,36(1):91-97. [ Zhang S J, Jiang J J, Liao Y M. Application of the SBAS technique in potential landslide identification in the Minjiang Waster-shed[J]. Mountain Research, 2018,36(1):91-97. ]
- [27] 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 Dan-ba, Sichuan[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018,43(12):2039-2049. ]
- [28] Meisina C, Zucca F, Notti D, et al. Geological interpretation of PSInSAR data at regional scale[J]. Sensors, 2008,8(11):7469-7492.
- [29] 郭果,陈筠,李明惠.土质滑坡发育概率与坡度间关系研究[J].工程地质学,2013,21(4):607-612. [ Chen G, Chen J, Li M H. Statistic relationship between slope gradient and landslide probability in soil slopes around reservoir [J]. Journal of Engineering Geology, 2013,21(4):607-612. ]
- [30] 熊俊楠,赵云亮,程维明.四川省山洪灾害时空分布规律及其影响因素研究[J].地球信息科学学报,2018,20(10):1443-1456. [ Xiong J N, Zhao Y L, Cheng W M. Temporal- spatial distribution and the influencing factors of Mountain-Flood disasters in Sichuan province[J]. Journal of Geo-Information Science. 2018, 20(10):1443-1456. ]
- [31] 牛全福,冯尊斌,党星海,等.黄土区滑坡研究中地形因子的选取与适宜性分析[J].地球信息科学学报,2017,19(12):1584-1592. [ Niu Q F, Feng Z B, Dang X H, et al. Suitability analysis of topographic factors in loess landslide research[J]. Journal of Geo- information Science. 2017,19(12):1584-1592. ]
- [32] 中国地质调查局地质环境监测院.中国地质灾害分布图[EB/OL]. [http://www.cigem.cgs.gov.cn/sghdzcg/dzzh\\_4869/dzzhdc\\_4871/201507/t20150701\\_405810.html](http://www.cigem.cgs.gov.cn/sghdzcg/dzzh_4869/dzzhdc_4871/201507/t20150701_405810.html), 2015-07-01. [ China Geological Survey Bureau Geological Environment Monitoring Institute. China's geological disaster map[EB/OL]. [http://www.cigem.cgs.gov.cn/sghdzcg/dzzh\\_4869/dzzhdc\\_4871/201507/t20150701\\_405810.html](http://www.cigem.cgs.gov.cn/sghdzcg/dzzh_4869/dzzhdc_4871/201507/t20150701_405810.html), 2015-07-01. ]