

## 典型黄土丘陵区地质灾害隐患识别与时序监测

尹玉玲,徐素宁,王 军,胡 克

Identification and time series monitoring of hidden dangers of geological hazards in the typical loess hilly regions YIN Yuling, XU Suning, WANG Jun, and HU Ke

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211004

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

## 地质灾害隐患和水文地质环境地质调查计划进展

Achievements of the program of geological investigation on geo-hazards and hydrogeology and environmental geology 李文鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 1-1

## 基于LoRa的地质灾害分布式实时监测系统设计

Design of the distributed real-time monitoring system for geological hazards based on LoRa 郭伟, 王晨辉, 李鹏, 孟庆佳 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 107-113

## 基于光纤传感技术的土工格栅变形及受力研究

A study of deformation and stress of geogrids based on optical fiber sensing technology 刘倩萁, 张孟喜, 洪成雨 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 119-125

## 基于广播RTK边缘计算的北斗高精度地质灾害监测系统及应用分析

The Beidou high precision geological disaster monitoring system based on RTK edge calculation and its application analysis 朱真, 江思义, 刘小明, 李志宇 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 176–183

## 典型地貌区原状黄土孔隙细观特征研究

Research on pore microscopic characteristics of undisturbed loess in typical geomorphologies 刘钊钊, 钟秀梅, 张洪伟, 高中南, 梁收运, 王谦 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 148-148

## 适用于地质灾害调查的微型无人机航线控制系统设计与实现

Design and implementation of a micro-UAV route control system for geological hazard investigation 马娟, 张鸣之, 冯振, 黄, 薛跃明, 石爱军, 邵海 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 37-37



关注微信公众号,获得更多资讯信息

#### DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211004

尹玉玲,徐素宁,王军,等.典型黄土丘陵区地质灾害隐患识别与时序监测 [J].水文地质工程地质, 2023, 50(2): 141-149. YIN Yuling, XU Suning, WANG Jun, *et al.* Identification and time series monitoring of hidden dangers of geological hazards in the typical loess hilly regions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 141-149.

# 典型黄土丘陵区地质灾害隐患识别与时序监测

尹玉玲1,徐素宁2,王 军3,胡 克1

(1. 中国地质大学(北京)海洋学院,北京 100083;2. 自然资源部国土卫星遥感应用中心,北京 100048;3. 宁夏回族自治区矿产地质调查院,宁夏银川 750021)

摘要: 宁厦南部地区以黄土丘陵地貌为主,区内沟壑纵横,小型滑坡较为发育,地表形变监测难度大。为探索黄土丘陵区的地质灾害隐患识别方法,以宁夏回族自治区固原市泾源县为研究区,应用 SBAS-InSAR 技术对采集到的 2016 年 7 月一2021 年 5 月的 11 期升轨 L 波段 ALOS-2 数据进行处理,得到形变速率结果。联合高分光学影像,根据形变速率、形变规模、坡度、形变区到承灾体的距离等因素进行综合分析,在泾源县共识别疑似隐患 27 处。经实地验证,其中 22 处形变迹象较明显、而且有明确的承灾体,确定为地质灾害隐患。对其中典型隐患点进行时序形变分析,发现这些区域在监测时间段内有持续显著的地表形变,最大沉降速率达到 91.53 mm/a。结果表明:在黄土丘陵区,应用 L 波段 SAR 数据,采用 SBAS-InSAR 技术的地质灾害形变监测效果显著,联合高分辨率的光学影像数据、应用综合遥感识别的方法,在该地区地质灾害隐患识别的正确率较高,具有很好的适用性。未来可编程采集升、降轨结合的 L 波段数据、结合无人机 LiDAR 数据做更深入的研究,以进一步提高地质灾害隐患识别的准确率,为地质灾害精准防治做好技术支撑。

关键词:地质灾害隐患识别; InSAR 技术; 光学遥感技术; 黄土丘陵区; 时序监测

中图分类号: P694 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2023)02-0141-09

## Identification and time series monitoring of hidden dangers of geological hazards in the typical loess hilly regions

 $YIN \ Yuling^1, \ XU \ Suning^2, \ WANG \ Jun^3, \ HU \ Ke^1$ 

 (1. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Land Satellite Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China; 3. Mineral Geological Survey Institute of Ningxia Huizu Zizhiqu, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

**Abstract:** The geomorphology of southern Ningxia is dominated by loess hills, with gullies and well-developed small landslides in the area, making surface deformation monitoring difficult. To explore the identification method of geological hazards in the loess hilly area, Jingyuan district in the city of Guyuan in Ningxia Huizu Zizhiqu is taken as the study area, and the SBAS-InSAR technology is applied to process a total of 11 periods of ascending L-band ALOS-2 data collected from July 2016 to May 2021 to obtain the deformation rate of the Jingyuan district. Combined with high-resolution optical images, a comprehensive analysis is carried out according to factors such as deformation rate, deformation scale, slope, and disaster-bearing body. A total of 27 suspected hidden dangers

收稿日期: 2022-11-01; 修订日期: 2023-01-04 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 自然灾害防治体系建设补助资金遥感调查项目(NXYSDZC-2021-025); 基于国产卫星的地质灾害调查监测系统研制与示范应用 (发改办高技 [2012]2083 号)

第一作者: 尹玉玲(1998-),女,硕士研究生,主要从事资源与环境遥感研究工作。E-mail: 1070348728@qq.com

通讯作者:徐素宁(1968-),女,教授级高工,主要从事地质环境遥感监测技术方法研究。E-mail: 573014656@qq.com

are identified. After field verification, 22 of them show obvious signs of deformation and have clear hazardbearing bodies. The time-series deformation analysis of the typical hidden danger points shows that these areas have continuous and significant surface deformation during the monitoring period, and the maximum subsidence rate reaches 91.53 mm/a. The results show that the combined L-band SAR and high-definition optical image data and the application of the integrated remote sensing identification method are highly accurate and are of high applicability in the area. The next step is to collect L-band data on a combination of ascending and descending orbits and to conduct in-depth research on the basis of LiDAR data from drones in order to further improve the accuracy of geological hazard identification and to provide technical support for the precise prevention and control of geological hazards.

**Keywords**: identification of hidden dangers; InSAR technology; optical remote sensing technology; loess hilly region; time series monitoring

黄土丘陵区是地质灾害易发区和频发区,给人民 生命和财产安全带来严重威胁<sup>[1]</sup>。近年来,联合 InSAR、 光学遥感等手段的综合遥感在地质灾害隐患识别方 面受到研究者的重视,具有广阔的应用前景<sup>[2-3]</sup>。

20世纪70年代,国外学者将 InSAR 技术应用于 对地观测<sup>[4]</sup>,因其具有全天时、全天候、大范围、高精 度和高空间分辨率的优势,得到越来越多专家的认 可,并逐步应用到地震<sup>[5]</sup>、火山活动<sup>[6]</sup>以及缓慢地表形 变监测<sup>[7]</sup>等领域。

国内学者于 2000 年左右开始 InSAR 技术在地质 灾害监测方面的研究<sup>[8]</sup>。在近 20 年的研究过程中,学 者们在三峡库区滑坡<sup>[9-10]</sup>、金沙江白格滑坡<sup>[11-12]</sup>、 黄泥坝子滑坡<sup>[13]</sup>等西部山区以及甘肃永靖黑方台滑 坡<sup>[14-17]</sup>、甘肃舟曲泥石流<sup>[18]</sup>、陕西延安淹土安滑坡<sup>[19]</sup> 等西北黄土地区开展地质灾害监测试验,研究内容主 要集中在方法的适用性、广域形变监测、时序演化规 律、灾害风险评估等方面。

近年来,联合 InSAR、光学遥感等手段的综合遥 感技术在地质灾害防治方面迅速推动,为地质灾害监 测、防治提供了一种新的方法。

黄土丘陵区是黄土高原地区的地质灾害高易发 区,主要位于陕西、甘肃、宁夏、青海、山西等地,属 温带大陆性气候,兼具黄土地貌和丘陵地貌的特 点:一方面,地表土体结构疏松,沟谷密度大,地质灾 害易发;另一方面,降水相对集中,受降雨和地表水的 侵蚀,地质灾害突发性强,均匀缓慢变形的地表过程 不突出。

宁夏回族自治区固原市泾源县地处黄土高原西部,地貌形态整体上属于剥蚀侵蚀挤压型断块中山区,区内滑坡最为发育,崩塌次之,泥石流较少<sup>[20]</sup>。与其他黄土地区不同的是,该地区植被覆盖度较高,经

试验,C波段的哨兵一号雷达卫星数据处理结果在部分区域有明显的失相干现象,导致无法得到有效的监测结果,故选择L波段的ALOS数据联合高分光学影像开展泾源县地质灾害的隐患识别探索,为黄土丘陵区地质灾害隐患的识别与防治提供支撑。

#### 1 研究区概况和数据来源

#### 1.1 研究区概况

泾源县位于六盘山东麓,辖4乡3镇96个行政 村,截至2022年底总人口11.5万,土地总面积1131km<sup>2</sup>, 地势西高东低(图1),大部分区域在1730~2350m 之间。地貌分为侵蚀构造中山区、剥蚀构造丘陵区、 侵蚀构造低山区和侵蚀堆积河谷阶地,地形比较复 杂,沟壑纵横。出露的地层以白垩系、新近系、第四 系为主,其中第四系土体以中晚更新统黄土为主,广 泛分布于地表,第四系黄土与新近系棕红色泥岩是易 崩易滑地层。区内褶皱、断裂较为发育,新构造活动 较为强烈。地表水系发育,有大小河流16条,溪流 343条,年均径流量2.4×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,年均气温6.9°C,日照时数 2370h,年均降水量为641.5 mm,属温带半湿润区,为 森林草原类型气候,是国家级重点生态功能区。

泾源县自然环境脆弱,根据 2021 年地质灾害排查 成果,地质灾害(隐患)点共 85 处,其中滑坡(隐患) 53 处,崩塌(隐患)31处,泥石流 1 处。地质灾害发育 的类型以黄土滑坡为主,少量岩质滑坡。从规模上来 看,崩塌、泥石流均为小型地质灾害(隐患),滑坡规模 以小型为主(44 处),占滑坡(隐患)的 83%,中型、大 型滑坡较少,分别只有 6 处和 3 处。

1.2 数据来源

#### 1.2.1 光学数据源

光学数据主要采用 2016—2021 年高分 2 号光学



Fig. 1 Landform type map of the Jingyuan district

影像、以及 Google 历史影像。高分 2 号是我国自行研 究发射的第一颗亚米级的高分辨率卫星,其全色波段 的星下分辨率可以达到 0.81 m,轨道高度为 631 km, 具有高精度、高空间分辨率的特点。Google 影像是 卫星影像与航拍数据的整合,包括 0.61 m 分辨率的 Quick Bird 影像、1.0 m 分辨率的 IKONOS 影像、0.50 m 分辨率的 GeoEye 影像及 2.50 m 分辨率的 SPOTS 影 像,具有全覆盖、高分辨率、长时间动态监测等优点。 1.2.2 雷达数据源

泾源县地处低山丘陵区,考虑到地形影响,宜选 用升、降轨结合的雷达数据。哨兵一号(Sentinel-1)是 欧空局公开的雷达数据,覆盖全面、时相连续性好,因 此首先获取 2020 年 1 月一2021 年 5 月升轨、降轨各 43 景。但是,由于六盘山区植被相对较茂密,C波段 波难以穿透植被以及分辨率较低等原因,失相干严重。

相比 C 波段数据, L 波段数据波长更长、分辨率 更高,具有更好的相干性,更适用于高植被覆盖区的 地表形变监测。获取到该区域从 2016 年 7 月 28 日— 2021 年 5 月 27 日共 11 期 ALOS-2 升轨数据, 10 m 分 辨率,条带模式,极化方式为 HH,幅宽 70 km,卫星人 射角为 36.2°,对坡向偏东方向的形变监测更加敏感<sup>[21]</sup>。 **1.2.3** 其他数据源

选用 ALOS 12.5m 分辨率的 DEM 作为辅助数据, 用于 InSAR 数据处理过程中配准、去除地形相位、坡 度信息提取等。

## 2 研究方法

#### 2.1 SBAS-InSAR 数据处理

2002 年 Berardino<sup>[22]</sup>提出小基线集(SBAS-InSAR), 又称短基线集,用于提取低分辨率、大尺度地表形变, 是目前有代表性的 D-InSAR 方法之一。SBAS 方法根 据研究所需要的时空基线阈值组合,生成多主影像的 序列干涉图,有效减弱或去除高海拔多云雾区域的大 气效应,从而保证地质灾害形变监测的精度<sup>[23]</sup>。

## 2.1.1 数据处理

#### (1)SAR影像的配准

SBAS 方法是对同名点进行的时间序列分析,需 将干涉图配准到同一坐标系统。由于形变不同以及 噪声影响,直接对干涉图进行相位配准是相当困难。 因此,选用同一景主影像(取 2017年 11月 25 日获取 的 SAR 影像作为主影像),将所有影像以复相干系数 作 为测度配准至同一坐标系统,来解决干涉图 之间的配准问题。将配准后的影像进行自由组合,选 取相干性较好的干涉图共 20个,时空基线连接图见 图 2。



#### (2)高相干点选取

在利用 SBAS 时序分析模型解算形变速率之前, 进行相干目标的筛选,选取工作区内相干性大于 0.3 的所有点。

(3)沉降速率和形变场的获取

采用奇异值分解的方法进行求解,得到各时间区间的沉降速率<sup>[24]</sup>。各时段沉降速率在时间域上进行积分,可得到各个时间点的累积形变量,从而获得时间序列形变。

#### 2.1.2 InSAR 处理结果

2016年7月28日-2021年5月27日ALOS-2数

据形变速率图(沿雷达视线向,即LOS向)如图3,其 中,形变速率负值表示形变沿LOS方向靠近卫星 传感器的方向运动,正值表示形变沿LOS方向远离 卫星传感器的方向运动。该区域累积形变量值分布 在-458.50~296.49 mm之间,与形变速率分布情况基 本一致。

2.2 疑似滑坡灾害隐患区的提取

在形变速率的基础上,根据地质灾害行业的相关标准规范,结合实际工作经验,选择与成灾密切相关的形变速率、形变区面积、坡度,形变区到承灾体的距离等要素,对形变结果进行提取,并将其结果作为疑似隐患区。

#### 2.2.1 形变速率

根据前人研究<sup>[25]</sup>,结合黄土丘陵区的地质灾害形 变易反复特点,针对泾源县设定沉降(或抬升)速率数 值大于10mm/a的形变区域为高形变速率区,得到结果见 图 4(a),主要集中在泾源县西部六盘山地区和东北部 山区,最高形变速率可达-91.53 mm/a。



图 3 泾源县 2016 年 / 月 28 日—2021 年 5 月 2/日 地表形变速率图





Fig. 4 Extraction results of the deformation areas in the Jingyuan district

#### 2.2.2 形变区的面积

根据《地质灾害风险调查评价技术要求》(1:50000) (试行),确定滑坡的最小规模为0.01 km<sup>2</sup>,通过筛选提 取,得到46760个多边形,结果分布见图4(b)。 2.2.3 坡度

斜坡是滑坡发生的必要条件,根据实际工作经验,该区小于10°的区域不易发生滑坡,在图4(b)基础 上再剔除坡度小于10°的区域,见图4(c),主要分布在 西部山区以及各地貌分区的过渡地带。

## 2.2.4 形变区到承灾体的距离

联合高分光学影像解译承灾体,将距离承灾体 (房屋、道路等)50m内的形变聚集区确定为疑似隐 患区,得到研究区滑坡隐患识别的室内初步结果,分 布在地势高差较大、人类活动频繁的地区,疑似隐患 区分布见图 4(d)。

2.2.5 疑似隐患提取结果

初步解译出泾源县地质灾害疑似隐患共27处,其 中滑坡隐患26处,泥石流隐患1处。根据形变特征和 承灾体类型,选择5处典型隐患点,将其InSAR结果 与光学影像对照,见图5。

图 5(a)形变区中心点的累积形变量达-190 mm, 形变区面积约 0.3 km<sup>2</sup>,由西北向东南滑动,威胁道路 (沪霍线)。图 5(b)形变区 2016—2021 年间向东南方 向累积滑动-160 mm,形变区面积约 0.4 km<sup>2</sup>,人工修路



图 5 典型隐患点 InSAR 形变与光学影像对照图 Fig. 5 Comparison of InSAR deformation and optical image of the typical hidden danger points

开挖坡脚,沟谷两侧稳定性较差,主要威胁形变区内 道路。图 5(c)受居民建房、福银高速修路等人类工程 活动影响,该处时序曲线发生波动,至 2021 年累积形 变量为-50 mm,解译面积约 0.02 km<sup>2</sup>,威胁对象为居民 房屋和道路。图 5(d)形变区面积约 0.05 km<sup>2</sup>,由于人 类农田改造工程,导致原地貌环境发生改变,2016— 2021 年累积形变量达-200 mm,承灾体为坡顶道路。 图 5(e)形变区位于居民聚集区,人类建设活动频繁, LOS 向显示为沉降,形变区面积约 0.03 km<sup>2</sup>,中心点累 计形变量为-50 mm,向东南方向滑动,威胁居民房屋 和道路。

## 3 地质灾害隐患识别结果与验证

2022年3月,宁夏矿产地质调查院对27处疑似隐

患进行实地验证,其中 22 处分别存在泉水出露、台 坎、落水洞和拉裂等形变迹象,并有明确的威胁对象 (道路、房屋、水体),将其确定为地质灾害隐患点,见 图 6(由于规模较小,为在图中显示清楚,图中点为地 质灾害隐患中心点坐标);其余 5 处疑似隐患经实地 验证其中1处为自然风化剥蚀、4 处由于工程建设产 生废渣堆土以及农业耕作等人为活动引起的地表形 变现象。

与 2021 年地面调查的台账对照,其中有 8 处地质 灾害隐患点已记录在册,其余 14 处为本次研究新增 的地质灾害隐患点。

在实地验证过程中发现,部分滑坡隐患点可见醉 汉林、马刀树,见图 7(a),指示着滑坡具有变形的特征;在滑坡的后缘处出现落水洞、拉张裂缝等现象,见



Fig. 6 Distribution of the potential geological hazards in the Jingyuan district

图 7(b);在一些滑坡前缘坡脚处有陡坎、泉水出露现 象;也有一些滑坡坡体上出现电杆、烟囱、树木歪斜, 见图 7(c),房屋、道路、水渠变形的现象,见图 7(d), 均可指示解译出的滑坡(隐患)点在 2016年 7月 28 日-2021年 5月 27日间存在活动迹象,说明综合遥 感识别技术在该地区的适用性与可靠性。

## 4 典型隐患形变时序监测曲线分析

结合研究区内的地形特征与形变结果,选择泾源 县六盘山镇图 6 点 e(640424090008)进行分析,如图 8 所示。该形变区位于黄土丘陵边坡部位,黄土厚度 大,对于黄土丘陵区的地质灾害隐患识别更具有典 型性。

从图 8 中可以看出,该处隐患有明显的形变信号, 选滑坡不同位置的 p、q、r 分别作为滑坡的后、中、前 缘的代表点,进行 InSAR 时序监测,绘制监测曲线,发 现滑坡的强变形区主要位于滑坡后缘,累积形变量高 达-200 mm,该滑坡为推移式滑坡。

累积形变曲线(图 9)显示,滑坡在 2017 年 12 月— 2021 年 5 月间有明显的形变,位于滑坡监测点 p、q、 r 的变化趋势基本一致,整体呈下滑趋势。其中,位于 滑坡后缘的监测点 p 的累积位移-时间曲线的下 沉趋势表现得更为明显,滑坡表面累积变形量达到



图 7 泾源县黄土滑坡特征野外验证照片 Fig. 7 Field verification photos of the loess landslide characteristics in the Jingyuan district

-200 mm, 形变量较大。累积位移-时间曲线的波动说 明滑坡在监测时间内处于反复堆积与沉降的变形状态, 整体上仍呈下滑趋势; 越靠近滑坡前缘, 形变量越 小。例如在 2021 年 5 月 27 日, 滑坡后、中、前缘累积 形变量值分别为 200 mm、160 mm 和 110 mm。

结合历史光学影像和地形分析(图 10),此处滑坡 在雷达视线的 LOS 向,从高值向低值滑动,在 InSAR 监测结果中表现出负的形变(远离卫星)。

经野外核查, 与综合遥感解译结果一致, 为滑坡 隐患点, 面积 81 716 m<sup>2</sup>, 属大型规模。其形变原因为 人工开挖隧道, 在坡脚下削坡建房, 坡脚建有高约 2 m 的护坡, 在靠近坡脚处可见 2 处泉水出露, 公路南 侧泉水流量 0.000 1 m<sup>3</sup>/s, 北侧泉水流量 0.000 f m<sup>3</sup>/s, 坡 下冲沟内有常年性流水, 水体清澈, 流量 0.000 5 m<sup>3</sup>/s, 见图 7(e)。承灾体为沪霍线高速、六盘山隧道和隧 道机装室, 坡体现状基本稳定, 但在持续性或强降雨





的情况下有发生滑坡的风险。

## 5 讨论

通过研究,形成如下结果和认识:

(1)应用 L 波段雷达卫星的 SBAS-InSAR 和高分 光学影像的综合分析方法,在泾源县共识别出疑似隐 患点 27 处。经野外验证,判定 22 处为地质灾害隐患



点, 识别的正确率达 77.8 %, 表明该方法对黄土丘陵区 的地质灾害隐患识别是有效的, 具有较好的应用前景。

这个正确率仅就识别出的隐患点而言,不包含受数据获取局限导致的漏判。

(2) 雷达数据从 2016 年 7 月—2021 年 5 月共 11 期 ALOS-2 升轨数据, 就数据本身分析, 有两个弱点, 一 是缺少降轨数据, 二是时间跨度大, 可能导致一些点 失相干、形变信息提取不全和地质灾害隐患的漏判。

进一步分析发现,一定程度上,该研究区的自然 地理条件,克服了数据本身的缺陷:使用升轨雷达数 据的 InSAR 对于东方向的形变监测更加敏感,泾源县 位于六盘山东麓,境内山体走向为近南北向,坡向朝





水文地质工程地质

东的区域占比较大, 隐患识别的有效性提高; 黄土丘 陵区的高差相对较小, 因地形引起的叠掩、阴影对 InSAR 形变监测的影响也较少; 由于 L 波段数据较好的穿透 性, 有效减少山区植被对于 InSAR 形变监测的影响。

为减少地质灾害隐患的漏判,未来在该地区可规 划升、降轨结合的L波段数据获取,从而提高地质灾 害隐患识别的准确率。

从地质灾害隐患综合遥感识别的结果来看,22处 中有14处为新增隐患,8处为在册隐患。新增隐患点 可为地质灾害防治提供科学依据,供有关部门采取合 理的预防措施,减少人员伤亡以及经济财产损失。需 要指出的是,遥感识别的这些在册隐患点,反映了在 册隐患点的活动性,需要特别关注,及时采取措施。

## 6 结论

黄土丘陵区沟壑纵横、土体结构松散,在山区植 被又相对茂密。地理、地质环境条件决定了地质灾害 发育以中、小型滑坡为主,滑坡隐患识别主要从以下 3个方面考虑:

(1)数据方面,需要联合多源遥感数据:雷达数据 以升降轨结合、L 波段或分辨率较高的C 波段数据为 佳;光学遥感数据以优于亚米级的高分光学卫星数据 为佳;条件具备时建议获取机载 LiDAR 数据。

(2)方法上,推荐 SBAS-InSAR 结合高分光学影像 提取的综合遥感识别与时序分析方法,在重点隐患区 可进一步构建基于机载 LiDAR 测量的三维地表模型, 进行微地貌特征的提取分析,有助于提高隐患识别的 准确率。

(3)在隐患识别的结果上,对于新增的地质灾害 隐患点,其中形变规模较大、风险较大的隐患点需要 重点关注;对于在册隐患点中持续形变的尤其要重点 关注、持续监测并在汛期加强防范。

#### 参考文献(References):

- [1] 胡胜.黄土高原滑坡空间格局及其对地貌演化的影响[D].西安:西北大学,2019.[HU Sheng. Spatial pattern of landslide in Loess Plateau and its influence on geomorphologic evolution[D]. Xi'an: Northwest University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [2] XIAO Lihan, ZHENG Rui, ZOU Rong. Coseismic slip distribution of the 2021 M<sub>w</sub>7.4 Maduo, Qinghai earthquake estimated from InSAR and GPS measurements[J]. Journal of Earth Science, 2022, 33(4): 885 – 891.

2022, 47(6): 2048 – 2057. [LIU Peiyuan, CHANG Ming, WU Binbin, et al. Route selection of landslide prone area in Wenchuan section of Chengdu-Wenchuan expressway based on SBAS-InSAR[J]. Earth Science, 2022, 47(6): 2048 – 2057. (in Chinese with English abstract)]

- GRAHAM L C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping[J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(6): 763 - 768.
- [5] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry[J]. Nature, 1993, 364: 138 142.
- [6] MASSONNET D, BRIOLE P, ARNAUD A. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry[J]. Nature, 1995, 375: 567 - 570.
- [7] GABRIEL A K, GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(B7): 9183.
- [8] XIA Ye, KAUFMANN H, GUO Xiaofang. Differential SAR interferometry using corner reflectors[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toronto, Canada: IEEE, 2002: 1243-1246.
- [9] 褚宏亮,邢顾莲,李昆仲,等.基于地面三维激光扫描的三峡库区危岩体监测[J].水文地质工程地质,2021,48(4):124 132. [CHU Hongliang, XING Gulian, LI Kunzhong, et al. Monitoring of dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area based on the terrestrial laser scanning method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021,48(4):124 132. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 卫童瑶,殷跃平,高杨,等.三峡库区巫山县塔坪H1滑 坡变形机制[J].水文地质工程地质,2020,47(4):73-81. [WEI Tongyao, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Deformation mechanism of the Taping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4):73-81. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 陆会燕,李为乐,许强,等.光学遥感与InSAR结合的 金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J].武汉 大学学报(信息科学版), 2019, 44(9): 1342 - 1354.
  [LU Huiyan, LI Weile, XU Qiang, et al. Early detection of landslides in the upstream and downstream areas of the baige landslide, the Jinsha River based on optical remote sensing and InSAR technologies[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(9): 1342 - 1354. (in Chinese with English abstract)]
- [12] LIU Xiaojie, ZHAO Chaoying, ZHANG Qin, et al. Integration of Sentinel-1 and ALOS/PALSAR-2 SAR

datasets for mapping active landslides along the Jinsha River corridor, China[J]. Engineering Geology, 2021, 284: 106033.

- [13] 解明礼,赵建军,巨能攀,等.多源数据滑坡时空演化规律研究——以黄泥坝子滑坡为例[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(6):923-932. [XIE Mingli, ZHAO Jianjun, JU Nengpan, et al. Research on temporal and spatial evolution of landslide based on multisource data: A case study of Huangnibazi landslide[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(6):923-932. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王志荣,吴玮江,周自强.甘肃黄土台塬区农业过量 灌溉引起的滑坡灾害[J].中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(3): 43 - 46. [WANG Zhirong, WU Weijiang, ZHOU Ziqiang. Landslide induced by over-irrigation in loess platform areas in Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(3): 43 - 46. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 赵超英,刘晓杰,张勤,等.甘肃黑方台黄土滑坡 InSAR识别、监测与失稳模式研究[J].武汉大学学报 (信息科学版), 2019, 44(7): 996 - 1007. [ZHAO Chaoying, LIU Xiaojie, ZHANG Qin, et al. Research on loess landslide identification, monitoring and failure mode with InSAR technique in Heifangtai, Gansu[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 996 - 1007. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 许强,彭大雷,何朝阳,等. 突发型黄土滑坡监测预警 理论方法研究——以甘肃黑方台为例[J]. 工程地质 学报, 2020, 28(1): 111 - 121. [XU Qiang, PENG Dalei, HE Chaoyang, et al. Theory and method of monitoring and early warning for sudden loess landslide: A case study at Heifangtai Terrace[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(1): 111 - 121. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 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(5):56-65.
  [LIU Chenwei, JIANG Yanan, LIAO Lu, et al. Identification and analysis of the main deformation area of Heifangtai Platform with SBAS-InSAR[J]. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(5):56 65. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 刘希林,郭梨花. 泥石流易发区灾害可接受程度对比研究——以云南东川和甘肃舟曲为例[J]. 地理科学,2019,39(1):164 172. [LIU Xilin, GUO Lihua. Comparisons of the acceptability of debris flow disasters

in the hazard-prone areas: Case studies in Dongchuan and Zhouqu[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(1): 164 – 172. (in Chinese with English abstract)]

- [19] 薛强,张茂省.延安淹土安滑坡监测预警及变形特征
  [J].西北地质,2018,51(2):220-226. [XUE Qiang, ZHANG Maosheng. Monitoring, early warning and deformation characteristics of Yantu'an landslide in Yan' an[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(2):220-226. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 孙永亮. 宁夏泾源县矿山地质灾害分布特征及防治 建议[J]. 世界有色金属, 2022, 19: 229 - 231. [SUN Yongliang. Distribution characteristics and prevention suggestions of mine geological disasters in Jingyuan County, Ningxia[J]. World Nonferrous Metals, 2022, 19: 229 - 231. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 朱建军, 胡俊, 李志伟, 等. InSAR滑坡监测研究进展
  [J]. 测 绘 学 报, 2022, 51(10): 2001 2019. [ZHU Jianjun, HU Jun, LI Zhiwei, et al. Recent progress in landslide monitoring with InSAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(10): 2001 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 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.
- [23] KURSAH M B, WANG Y, BAYOH H D, et al. A comparative study on the predictive ability of archived and SBAS-InSAR inventories for landslide susceptibility using frequency ratio model in Western Area, Sierra Leone[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(10): 387.
- [24] 葛大庆, 王艳, 郭小方, 等. 利用短基线差分干涉纹图 集监测地表形变场[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(2): 61 - 66. [GE Daqing, WANG Yan, GUO Xiaofang, et al. Surface deformation field monitoring by use of small-baseline differential interferograms stack[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(2): 61 -66. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 聂成顺. 基于InSAR和光学遥感的会东县滑坡隐患识别研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021. [NIE Chengshun. Recognition for potential landslides in Huidong County based on InSAR and optical remote sensing[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021. (in Chinese with English abstract)]

编辑:王支农