

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2024.03.012

## 基于 InSAR 技术的辽宁省本溪市南芬铁矿 滑坡形变时空特征及触发因素分析

殷宗敏, 何文熹, 柳 潇, 刘学浩

YIN Zong-Min, HE Wen-Xi, LIU Xiao, LIU Xue-Hao

中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205

Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, Hubei, China

**摘要:** 辽宁省本溪市南芬露天铁矿区滑坡灾害频发, 对其滑坡进行研究具有示范作用。本文利用 DInSAR 和 PSInSAR 技术对矿区坡体进行形变计算, 结合降雨和构造数据进行分析, 得出如下结论: (1) DInSAR 结果表明矿区坡体视线方向和垂直方向形变明显, 水平方向形变呈现向西南滑动, 且滑动幅度大于垂直方向, 沿最大坡度方向存在明显沉降, PSInSAR 结果表明坡体在 2021 年 4 月 8 日至 2021 年 8 月 18 日间呈现明显下滑; (2) 矿区滑坡体形变与降雨存在较强的正相关, 相关系数达 0.93; (3) 随着高度的降低, 坡体滑坡沉降速度呈现增加趋势。本研究表明 InSAR 技术对南芬露天铁矿区滑坡进行监测效果较好。

**关键词:** 南芬铁矿; 滑坡; DInSAR; PSInSAR; 降雨

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2024)-03-0574-09

**Yin Z M, He W X, Liu X and Liu X H. 2024. Spatiotemporal Characteristics and Triggering Factors Analysis of Landslide Deformation in Nanfen Iron Mine Based on InSAR Technology. *South China Geology*, 40(3): 574–582.**

**Abstract:** The Nanfen open-pit iron mine area of Benxi city, Liaoning province, experiences so frequent landslides to be focused. DInSAR and PSInSAR techniques are used to calculate deformations of the mine slope and analyzes the results in conjunction with rainfall and structural data. The conclusions are as follows: (1) DInSAR results indicate that the slope deformation in the mine area is significant in both the line-of-sight and vertical directions, with horizontal deformation showing a southwest sliding trend, and the sliding amplitude being greater than that in the vertical direction. The maximum slope direction shows significant subsidence. PSInSAR results indicate that the slope exhibited significant sliding between April 8, 2021 and August 18, 2021. (2) There is a strong positive correlation between slope deformation and rainfall, with a correlation coefficient of 0.93. (3) As elevation decreases, the rate of slope landslide subsidence increases. This study demonstrates that InSAR technology is highly effective for monitoring landslides in the Nanfen open-pit iron mine area.

**Key words:** Nanfen iron mine; landslide; DInSAR; PSInSAR; rainfall

收稿日期: 2024-02-21; 修回日期: 2024-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42107485)

第一作者: 殷宗敏(1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事遥感地质和自然资源督察研究, E-mail: 2267662868@qq.com

矿产资源的安全高效开采对我国经济的持续发展和能源资源的有效利用至关重要(刘辉等, 2023), 随着我国能源需求的增长和开采总量的提升, 导致大量高陡边坡的形成, 从而产生滑坡等地质灾害的风险增加(杨旺等, 2022)。鉴于高陡边坡容易导致滑坡灾害, 形变对于滑坡发生具有指示作用, 因此研究矿区边坡形变具有重要意义(虎小强等, 2023)。通过滑坡体的形变特征分析, 了解滑坡发生的影响因素及机理, 从而有针对性进行灾害治理, 为矿区安全和生产保驾护航(孙赫等, 2020)。

南芬露天铁矿区地质情况复杂, 矿区分布大量软性绿泥岩, 这些岩石在降雨后容易导致岩石强度下降, 从而产生滑坡(沙永莲等, 2021)。同时矿区岩石层中存在交错节理和软弱滑动面, 使得矿区的边坡岩体出现松动和张裂的情况加重, 从而造成严重的安全隐患, 对其进行研究刻不容缓(夏锐等, 2022)。

DInSAR 和 PSInSAR 技术在矿区滑坡形变监测方面具有重要的应用价值, 通过利用合成孔径雷达传感器获取的雷达波数据进行干涉处理, 实现对地表形变的高精度监测和分析。在矿区滑坡形变监测方面, DInSAR 和 PSInSAR 技术能够检测地表的微小形变, 包括沉降、抬升和水平位移等。通过比较不同时间点的 SAR 影像, 可以识别出矿区地表可能存在的滑坡形变迹象; 通过持续观测地表形变, 可以及时发现滑坡的活动迹象, 提前预警并采取相应的防范措施; 通过分析地表形变的时空变化规律, 可以揭示滑坡发生的机理和影响因素, 为矿区滑坡灾害的防治提供科学依据(张树衡等, 2023)。本文利用 InSAR 技术进行南芬露天铁矿区坡面形变监测, 有助于预测滑坡的发生, 保障矿区人民群众生命和财产安全。

## 1 区域概况

### 1.1 自然概况

南芬露天铁矿位于辽宁省本溪市南芬区(图 1), 于 1957 年建成投产, 是一座特大型现代化矿山, 其为亚洲年产量最大的单体露天矿山, 矿

区面积约为  $4.6 \text{ km}^2$  (郭隆基等, 2023), 本文选择矿区内一坡体作为研究区域(图 2)。矿区平均海拔约为 500 m, 其中最高点达 960 多米, 最低点为 290 多米, 地貌陡峭, 山脉呈东西走向。区域内植被较为稀疏, 主要是落叶阔叶林, 矿区水资源充足, 有两条主要河流, 流向为自东向西(王嘉等, 2022)。矿区属于温带季风气候, 夏季受东南季风影响明显, 降雨多发生于 7、8 月份, 雨量充沛, 最大日降水量达 274 mm, 冬季寒冷干燥, 最低气温可降至  $-32.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 矿区岩石受降水影响易发生滑坡灾害(彭岩岩等, 2022)。

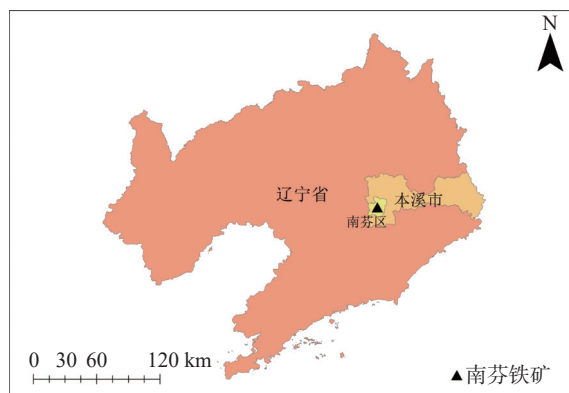


图 1 南芬铁矿地理位置图

Fig. 1 Location map of Nanfen iron deposit

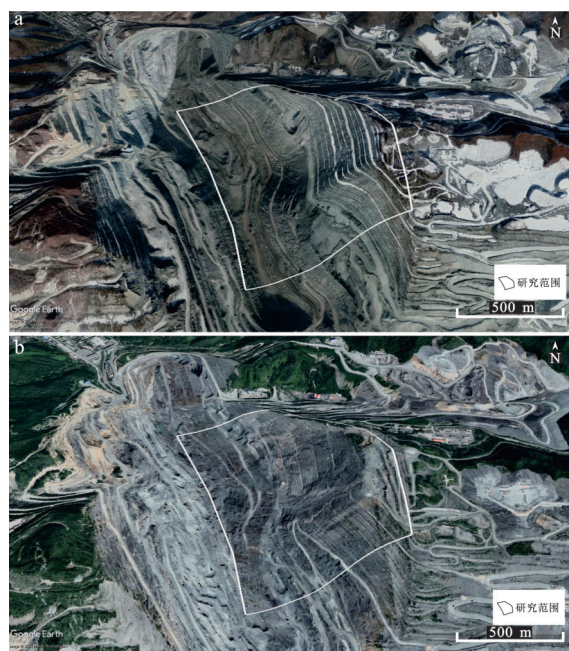


图 2 南芬铁矿区坡体滑坡前(a)、后(b)影像对比

Fig. 2 Comparison of images before(a) and after(b) the landslide in Nanfen iron deposit

## 1.2 地质构造

矿体整体呈层状-似层状分布于鞍山群茨沟组变质岩系中,呈 NW 走向,倾角在  $40^{\circ}\sim 55^{\circ}$  之间,与围岩界线清晰且层位稳定,矿床中富铁矿体嵌入于条带状磁铁石英岩之中(陶志刚等, 2021)。矿区内主要构造为倒转穹隆构造、露天矿倒转背斜以及断裂构造,其中倒转穹隆构造呈椭圆状,由混合花岗片麻岩组成,东西长 6 km,南北长 7.5 km,构造的东翼倾向南西,西翼倾向西北。矿区的压扭性断裂表现为 NNE 或近南北向,长约 10 km,宽 5 ~ 20 m,且向西倾斜(杨晓杰等, 2020)。矿区内地下水存在孔隙水、裂隙水和脉状含水层,庙尔沟和黄柏峪河谷由砂石和砾石组成,孔隙水分布其中,水位深度为 0.5 ~ 1 m (孙光林等, 2019)。

研究区为矿区范围内永久坡体,该区域不再进行开采活动(郑质彬, 2019),其滑坡前后影像对比如图 2 所示,其中图 2a 为 2020 年 2 月影像,图 2b 为 2022 年 8 月影像,查阅相关资料,发现南芬露天铁矿在 2021 年 6 月 19 号发生滑坡,通过历史影像分析,发现南芬铁矿研究区域内存在明显的滑坡痕迹,位置为坡体中心沟壑区域,滑坡面积约  $0.13 \text{ km}^2$ 。

## 2 研究方法

### 2.1 DInSAR 技术

DInSAR 可以感知和记录监测区域中连续变化的微小形变,实现了对长时间跨度的微小变形的精确监测(徐子兴等, 2022)。DInSAR 技术具有测速快、监测范围广、全天候、高精度等优势,在矿山测量、城市地面沉降、基础设施变形监测等领域得到广泛应用(张树衡等, 2023)。它通过卫星对同一地区进行两次拍摄,获取不同时期的数据,并检测两个时间段内发生的变化,从而产生相关干涉相位差值,通过滤波等手段消除干扰相位,从而获取真实的形变相位信息(麻学飞等, 2022)。DInSAR 计算使用的雷达数据为 Sentinel-1A 数据,本文选取影像时间为 2021 年 6 月 8 日和 2021 年 6 月 20 日,覆盖了滑坡发生时间 2021

年 6 月 19 日。本文 InSAR 计算区域为图 2 中的研究区域, DInSAR 技术的计算公式可以表示为:

$$\varphi = \varphi^{\text{def}} + \varphi^{\text{flat}} + \varphi^{\text{tope}} + \varphi^{\text{atm}} + \varphi^{\text{noise}} \quad (1)$$

其中,  $\varphi^{\text{def}}$  为形变相位,  $\varphi^{\text{flat}}$  为平地相位,  $\varphi^{\text{tope}}$  为地形相位,  $\varphi^{\text{atm}}$  和  $\varphi^{\text{noise}}$  分别为大气相位和噪声相位。DInSAR 数据处理流程包括: (1) 对所有需要的 SLC 影像进行裁剪,以提高数据处理效率,确保结果的精确性; (2) 对 Sentinel-1A 数据进行双轨差分干涉处理,并按照时间顺序进行处理,使用 Goldstein 自适应滤波法降低由时空基线失相干引入的相位噪声,在保持干涉条纹清晰的同时能有效地去除噪声; (3) 使用最小二乘法等算法进行相位解缠,相干系数阈值设置为 0.2,生成对应的掩膜文件; (4) 对形变场进行地理编码,将其从斜距坐标系投影到地理经纬度坐标系,使数据更容易理解和判读(于冰等, 2023)。

### 2.2 PSInSAR 技术

时序 InSAR 是利用多个 SAR 影像的时间序列数据来进行地表形变监测(李梦梦等, 2021),通过获取地表形变速率,从而进行时间序列地质灾害监测(王志红等, 2023)。PSInSAR 是时序 InSAR 的一种重要方法,它专注于监测具有稳定散射特性的地表点(PS 点),如建筑物、桥梁等人造结构(曹发伟和廖维谷, 2021)。PSInSAR 数据处理涉及影像配准、干涉相位生成(生成的相位包含形变相位、地形相位、大气相位和噪声相位等)、相位滤波、地理编码等,最终获取时间尺度上的形变信息(韩守富等, 2020; 殷宗敏等, 2022), PSInSAR 技术的干涉图相位信息计算公式如下:

$$\begin{aligned} \delta\varphi_j &= \varphi(t_B) - \varphi(t_A) \\ &\approx \delta\varphi_j^{\text{def}} + \delta\varphi_j^{\text{tope}} + \delta\varphi_j^{\text{atm}} + \delta\varphi_j^{\text{noise}} \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $\delta\varphi_j$  表示干涉相位;  $\varphi(t_A)$ 、 $\varphi(t_B)$  分别表示  $t_A$ 、 $t_B$  时刻的相位;  $\delta\varphi_j^{\text{def}}$  表示视线方向的形变相位;  $\delta\varphi_j^{\text{tope}}$  表示地形相位;  $\delta\varphi_j^{\text{atm}}$  表示大气相位;  $\delta\varphi_j^{\text{noise}}$  表示噪声相位。

本文使用 2021 年 1 月 3 日至 2021 年 12 月 29 日的 31 景 Sentinel-1A 数据(时间间隔为 12 天)进行 PSInSAR 计算,所用影像信息如表 1 所示,该数据为干涉宽幅 (IW) 模式,轨道为 25,极化方式为 VV+VH,使用的 InSAR 计算平台为开源集

表 1 研究区进行 PSInSAR 计算所用的影像信息  
Table 1 Time-series InSAR image data in the study area

| 模式 | 轨道 | 极化方式  | 影像时间(年月日)                                                                        |
|----|----|-------|----------------------------------------------------------------------------------|
| IW | 25 | VV+VH | 20210103 20210115 20210127 20210208 20210220 20210304 20210316 20210328 20210409 |
|    |    |       | 20210421 20210503 20210515 20210527 20210608 20210620 20210702 20210714 20210726 |
|    |    |       | 20210807 20210819 20210831 20210912 20210924 20211006 20211018 20211030 20211111 |
|    |    |       | 20211123 20211205 20211217 20211229                                              |
|    |    |       |                                                                                  |

成软件 EZ-InSAR, 该软件进行相干计算使用的软件为 isce2, 进行时序形变计算使用的软件为 stamps。

数据处理和形变计算包括: (1) 生成连接图和干涉对组合, 设置适当的时空基线阈值, 选择超级主影像进行处理, 通过最优化计算, 选择 2021 年 6 月 8 日的影像作为主影像, 该时间点正好位于监测时间段中间; (2) 进行干涉工作流处理, 包括复数像对共轭相乘、地形相位剔除、噪声滤波和最小二乘法解缠相位, 干涉相位图和滤波后干涉相位图如图 3、图 4 所示, 可以看出滤波后干涉相位相对平滑, 去除了明显的相位跳变, 保证了相干结果的可靠性; (3) 使用地面控制点进行多项式拟合优化, 从而进行轨道精炼和重去平; (4) 进行 PSInSAR 反演, 计算残余地形和地表形变速率; (5) 进行地理编码, 将形变信息从极坐标转换成地理坐标, 从而获取视线方向上的形变(殷宗敏, 2018)。

## 3 结果分析

### 3.1 DInSAR 结果

DInSAR 计算的研究区形变结果如图 5 所示, 滑坡体视线方向(图 5a)和垂直方向(图 5b)形变, 呈现出上部形变为负值、下部形变为正值的现象, 原因为坡体上部存在明显的沉降, 使得碎屑在下部堆积或挤压下部, 下部形变表现为抬升。视线方向(图 5a)上滑动区域形变量均值为  $-16.15$  mm, 堆积区域形变量均值为  $16.93$  mm, 垂直方向(图 5b)上滑动区域形变量均值为  $-25.52$  mm, 堆积区域形变量均值为  $21.43$  mm。水平方向形变(图 5c)表示为参照正北方向的形变, 滑坡体水平方向形变表示为明显的负值, 滑动区域形变量均值为  $-44.76$  mm, 说明形变在水平方

向呈向西南滑动, 且滑动幅度明显大于垂直方向。最大坡度方向形变(图 5d)表示沿最大坡度方向发生的形变量, 滑坡体中心区域呈现形变负值, 形变量均值为  $-497.23$  mm, 说明该区域沿最大坡度方向有明显的沉降。

### 3.2 PSInSAR 结果

PSInSAR 计算的研究区内时序形变结果如图 6 所示, 参照图 2、图 5 可知滑坡体位于图 6a 中圈定的区域, 并呈现较大的沉降速度, 说明 PSInSAR 对该矿区的滑坡识别效果明显。对 PS 点的形变速度进行正态分布分析(图 6b)可以看出, 形变速度呈现明显的正态分布, 说明形变结果不存在极端误差值, 结果能够反映矿区的形变特征, 形变速度密度较大值集中在  $0 \sim 5$  mm/yr, 说明矿区整体呈现缓慢抬升, 可能与地表堆积或者地下活动有关。

### 3.3 形变时间分析

统计滑坡体上所有 PS 点的形变量均值, 按照时间序列绘制形变曲线, 并对形变曲线进行分段分析, 所得形变曲线如图 7 所示, 将形变曲线划分为初稳定阶段、末稳定阶段以及滑动阶段, 两种稳定状态间的曲线表示滑坡发生过程中的形变, 说明在 2021 年 4 月 8 日至 2021 年 8 月 18 日期间, 该区域发生了滑坡形变, 与该区域滑坡发生时间 6 月 19 日正好吻合。这表明 PSInSAR 能够明显地反映滑坡的发生过程, 可用来识别和分析滑坡。

分析该区域内降雨与滑坡形变之间的关系, 结果如图 8a 所示, 其中纵坐标主轴表示形变量, 副轴表示降雨量, 横坐标为时间, 并在图中标注了滑坡发生时间, 可以看出, 滑坡发生时正好处于雨量相对集中且较大的 6、7 月份, 很好地表明了滑坡发生与降雨的耦合关系, 同时可以看出 10 月份沉降大致达到最大值, 此时降雨量最大, 说明降雨

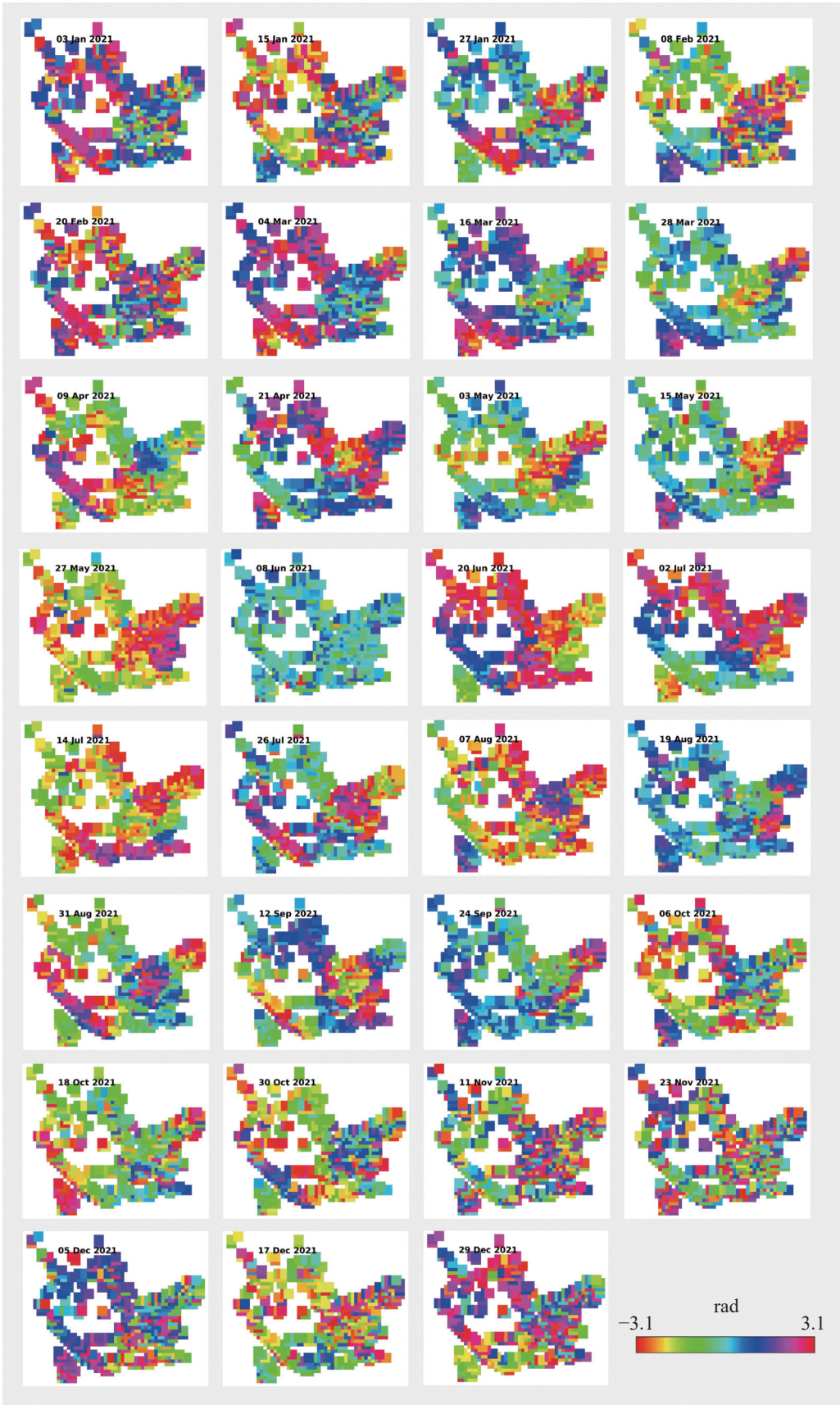


图 3 研究区干涉相位图

Fig. 3 Coherence map in the study area

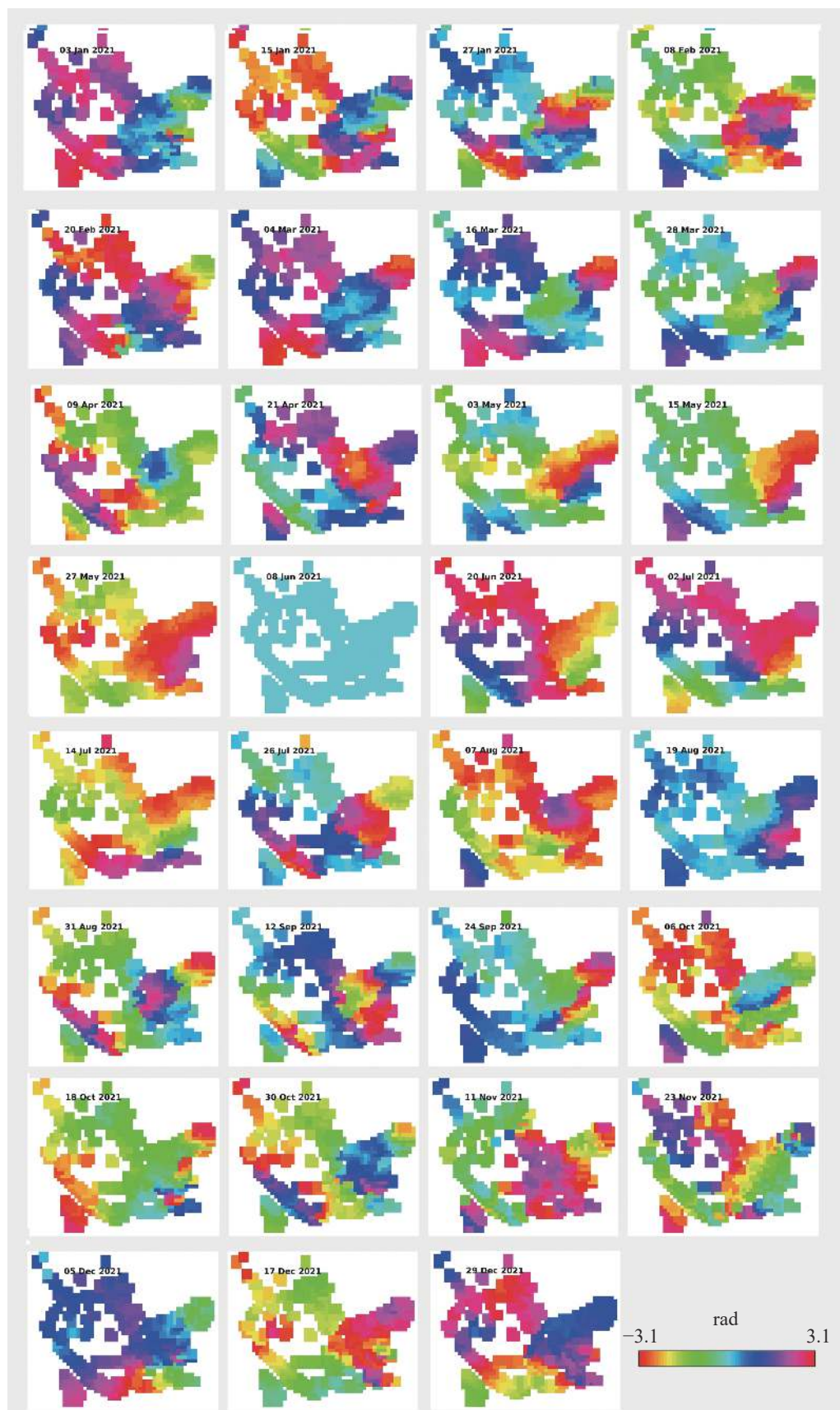


图 4 研究区滤波后干涉相位图

Fig. 4 Filtered coherence map in the study area

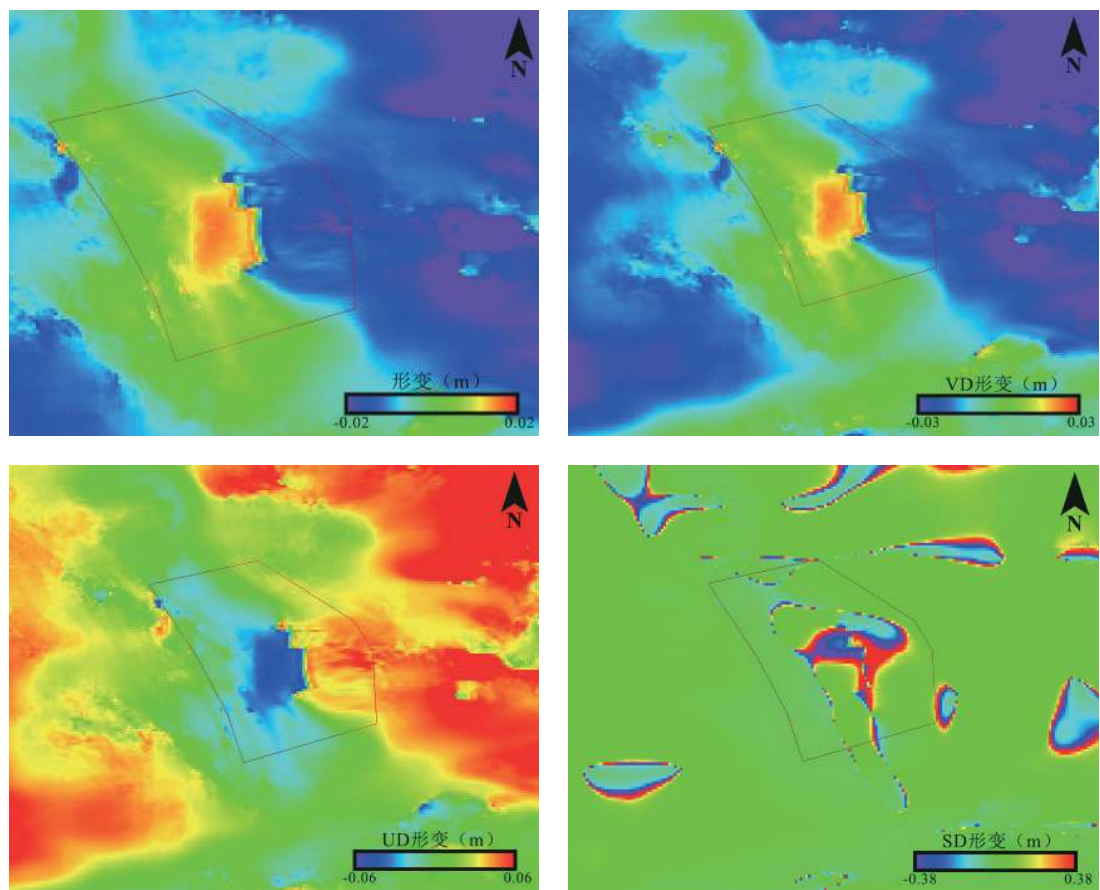


图 5 研究区 DInSAR 形变结果  
Fig. 5 DInSAR deformation results of the study area

a. 滑坡体视线方向形变; b. 滑坡体垂直方向形变; c. 滑坡体水平方向形变; d. 滑坡体最大坡度方向形变

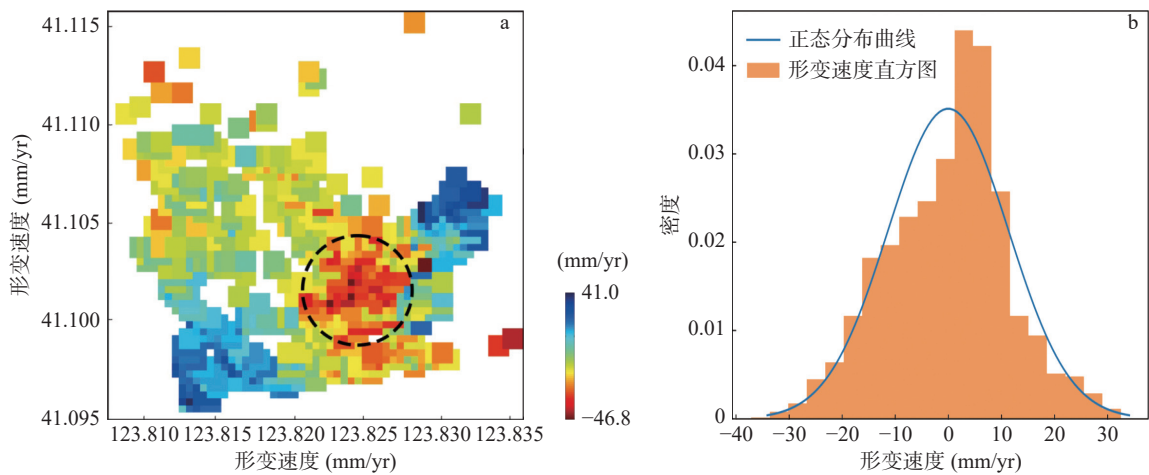


图 6 研究区 PSInSAR 形变速度图 (a) 和形变速度统计直方图 (b)  
Fig. 6 PSInSAR deformation velocity map (a) and deformation velocity histogram (b) of the study area

对该矿区的沉降发生具有较大的正相关性,即降雨促进了滑坡的发生。

为更好地说明降雨与形变之间的关系,分别选取影像对应日期的形变和降雨数据,剔除其中降雨为空的数据,以降雨数据为横坐标,形变为纵坐标,绘制散点图并拟合,计算相关系数,结果见图 8b 所示,可以看出,拟合曲线斜率为 1.39,说明降雨和形变存在正相关性,相关系数为 0.93,表

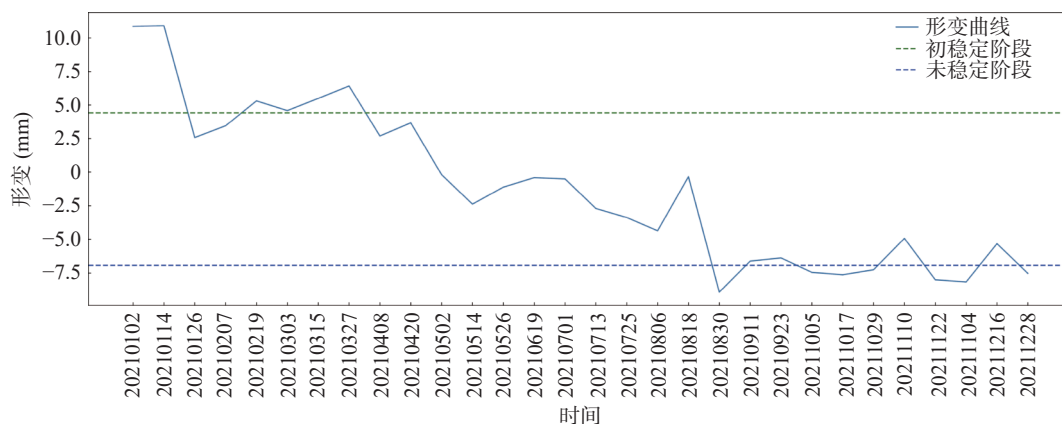


图 7 研究区滑坡体形变曲线

Fig. 7 Deformation curve of the landslide body in the study area

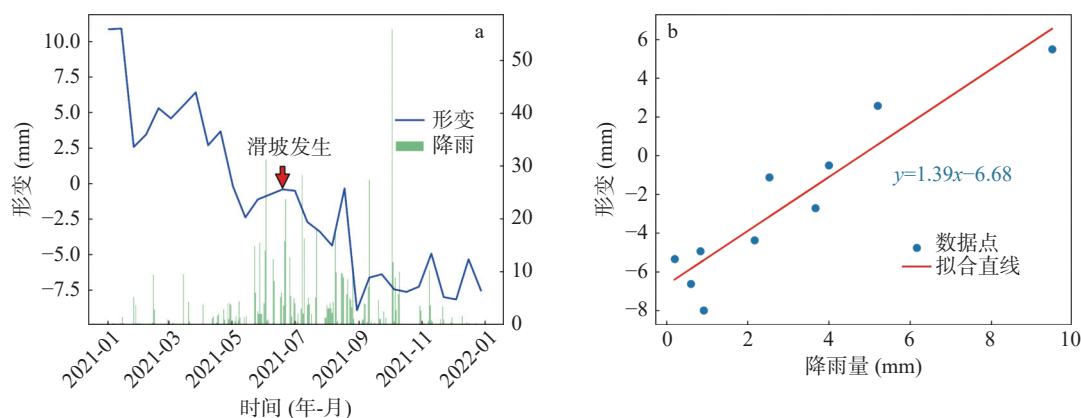


图 8 研究区滑坡曲线与降雨关系图 (a)、降雨与形变散点图 (b)

Fig. 8 Relationship between landslide curve and rainfall (a), scatter plot of rainfall and deformation (b) in the study area

明两者间具有很强的相关性,降雨是滑坡的强诱因之一。

### 3.4 形变空间分析

对滑坡体 PS 点的形变速度进行 3D 显示(图 9),

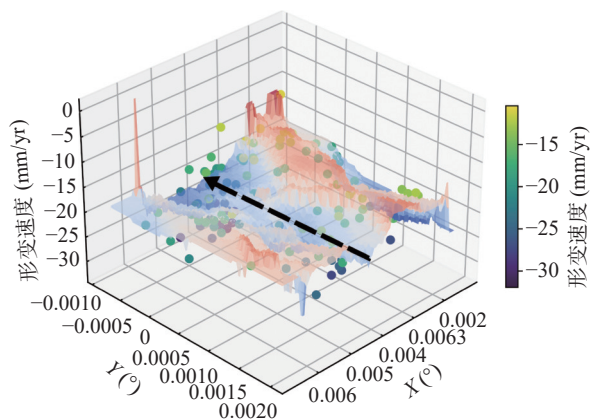


图 9 研究区滑坡体 3D 形变速度图

Fig. 9 3D deformation velocity display of landslide body in the study area

其中 X、Y 轴表示经、纬度坐标,Z 轴表示形变速度,由于滑坡发生方向为东北-西南方向,结合坐标值及方向,滑坡的滑动方向如箭头所示方向,滑坡体中心区域呈现较大的沉降速度,随着高度的降低沉降速度增加更明显。

## 4 结论与展望

(1) 南芬铁矿滑坡体视线方向和垂直方向形变明显,水平方向形变呈现向西南滑动,且滑动幅度明显大于垂直方向,滑坡体中心区域沿最大坡度方向有明显沉降,滑坡体边缘存在最大坡度方向上的抬升。

(2) 南芬铁矿滑坡体在 2021 年 4 月 8 日至 2021 年 8 月 18 日期间,呈现明显的下滑,与滑坡发生时间吻合,证明 PSInSAR 技术可用来识别和分析滑坡,能够反映滑坡前后的形变特征。滑坡

形变与降雨具有正相关性, 相关系数达 0.93, 说明降雨促进了滑坡的发生。

(3) 滑坡体滑动区域呈现较大沉降速度, 随着高度的降低沉降速度增加更明显。

(4) 在利用 InSAR 技术进行南芬露天铁矿滑坡原因分析时, 如果能辅助 GPS 监测数据, 对 InSAR 形变结果进行修正拟合, 所得结果会更加可靠。同时, 后期工作中如果能开展物理模型试验, 探究边坡的破坏模式, 深入了解滑坡机理, 可以更好的进行滑坡的监测预警, 后续将开展相应研究。

### 参考文献:

- 曹发伟, 廖维谷. 2021. SBAS 技术在矿区地面沉降监测中的应用 [J]. 测绘通报, (3): 156-158+163.
- 郭隆基, 何满潮, 瞿定军, 李和安, 王国均, 李金帅, 陶志刚. 2023. 南芬露天铁矿边坡稳定性分析与牛顿力临滑智能预警 [J]. 煤炭科学技术, 51(S1): 9-17.
- 韩守富, 赵宝强, 殷宗敏, 薛强, 马金辉. 2020. 基于 PS InSAR 技术的黄土高原地质灾害隐患识别 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 56(1): 1-7.
- 虎小强, 杨树文, 闫恒, 薛庆, 张乃心. 2023. 基于时序 InSAR 的新疆阿希矿区地表形变监测与分析 [J]. 自然资源遥感, 35(1): 171-179.
- 李梦梦, 范雪婷, 陈超, 李倩楠, 杨锦. 2021. 徐州矿区 2016—2018 年地面沉降监测与分析 [J]. 自然资源遥感, 33(4): 43-54.
- 刘辉, 陈斯涤, 朱晓峻, 张鹏飞, 王金正, 王庆伟, 司光亚. 2023. 基于 D-InSAR 技术的煤矿工业广场动态沉降特征研究 [J]. 煤田地质与勘探, 51(5): 99-112.
- 麻学飞, 张双成, 惠文华, 许强. 2022. 山西省临汾市矿区地表形变 InSAR 大范围探测与监测 [J]. 自然资源遥感, 34(3): 146-153.
- 彭岩岩, 宋南, 刘宇航, 张海江. 2022. 南芬露天铁矿边坡开挖稳定性实验研究 [J]. 矿冶工程, 42(6): 18-23+28.
- 沙永莲, 王晓文, 刘国祥, 张瑞, 张波. 2021. 基于 SBAS InSAR 的新疆哈密砂墩子煤田开采沉陷监测与反演 [J]. 自然资源遥感, 33(3): 194-201.
- 孙赫, 陈巍然, 牛玉芬, 徐晶. 2020. 基于 InSAR 的矿区沉降中心动态变化监测与分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 40(3): 276-280.
- 孙光林, 蒲娟, 胡江春, 边亚东, 陶志刚. 2019. 开挖对露天矿山软弱夹层边坡稳定性的影响分析——以南芬铁矿为例 [J]. 科学技术与工程, 19(33): 126-131.
- 陶志刚, 舒昱, 高毓山, 王一聪, 赵俊凯. 2021. 南芬露天铁矿高陡边坡失稳全过程物理模型试验研究 [J]. 中国矿业, 30(2): 101-106+113.
- 王嘉, 王敬翔, 张慧, 卜庆涛, 董强, 陶志刚. 2022. 南芬露天铁矿排土场高陡边坡稳定性分析及监测设计 [J]. 金属矿山, (12): 226-232.
- 王志红, 任金铜, 阎跃观, 刘吉波, 张琰君. 2023. InSAR 联合矢量倾角分段函数模型计算矿区地表下沉量 [J]. 测绘科学, 48(8): 169-181.
- 夏锐, 李铁, 张景发, 田云锋. 2022. 基于 SBAS-InSAR 技术的 M 矿区沉降监测与建筑群安全性研究 [J]. 自然灾害学报, 31(3): 175-183.
- 徐子兴, 季民, 张过, 陈振炜. 2022. 基于 SBAS-InSAR 技术和 Logistic 模型的矿区沉降动态预测方法 [J]. 自然资源遥感, 34(2): 20-29.
- 杨旺, 何毅, 张立峰, 王文辉, 陈有东, 陈毅. 2022. 甘肃金川矿区地表三维形变 InSAR 监测 [J]. 自然资源遥感, 34(1): 177-188.
- 杨晓杰, 孙洪磊, 郝振立, 曹金栋, 侯林, 彭文雨. 2020. 基于突变理论的南芬露天矿安全风险评价 [J]. 矿业研究与开发, 40(4): 24-27.
- 殷宗敏, 赵宝强, 叶润青. 2022. 时序 InSAR 技术在三峡库首区潜在滑坡识别中的应用研究 [J]. 华南地质, 38(2): 273-280.
- 殷宗敏. 2018. 基于时序 InSAR 技术与地形特征的黄土高原潜在滑坡识别研究 [D]. 兰州大学硕士学位论文.
- 于冰, 胡云亮, 刘国祥, 罗小军, 胡金龙. 2023. 时序 InSAR 反演唐山市二维地表形变时间序列 [J]. 测绘科学, 48(6): 82-94+230.
- 张树衡, 赵萍, 王宁, 赵思逸, 李湘凌, 宋仁亮, 赵卫东, 马雷. 2023. 集成 DInSAR 与 SBAS InSAR 的淮南丁集煤矿地面沉降监测 [J]. 地质科学, 58(4): 1521-1534.
- 郑质彬. 2019. 南芬露天矿 2011-1005 顺层滑坡机理物理模型实验研究 [D]. 绍兴文理学院硕士学位论文.