

# 基于时序 InSAR 技术的山区高速公路挖方边坡监测

李如仁<sup>1</sup>, 苏宇祺<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学 交通与测绘工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要:**针对传统人工水准监测风险高、难度大的问题,以本桓高速公路挖方边坡为例,提出一种利用 SBAS-InSAR 与 PS-InSAR 相结合的技术对挖方边坡进行形变监测。首先,采用 SBAS-InSAR 技术处理 2023 年 4 月—2024 年 1 月获取的 22 景 Sentinel-1A 数据,生成小基线差分干涉对,反演得出边坡形变值与形变趋势。然后,选取相同监测时间的水准点测量结果与 PS 点进行验证,并通过灰色关联度分析降雨量与边坡形变的关联度。监测结果显示,边坡沉降速率集中在 10.15~30.27 mm/a,沉降分析结果显示此路堑边坡整体较为稳定,时序 InSAR 相对水准测量具有全天时、全天候、全维度的特点,并具有可回溯性,表明时序 InSAR 技术对山区高速公路挖方边坡监测具有可行性与可靠性,确保高速公路挖方边坡安全稳定。

**关键词:**道路工程;边坡监测;短基线子集(SBAS-InSAR)技术;永久散射体的干涉测量(PS-InSAR)技术;沉降预测;灰色关联分析

中图分类号:TN929.5

文献标志码:A

## Monitoring of excavation slopes of mountainous expressways based on time series InSAR technology

LI Ruren<sup>1</sup>, SU Yuqi<sup>2</sup>

(1. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** To address the problems of high risk and difficulty of traditional artificial level monitoring, this study proposed a deformation monitoring of excavated slopes by using a combination of SBAS-InSAR and PS-InSAR technology with Benxi-Huanren Expressway excavated slopes as the engineering background. Firstly, the SBAS-InSAR technology was used to process 22 scenes of Sentinel-1A data acquired from April 2023 to January 2024 to generate small baseline differential interferometric pairs. After inversion, the slope deformation values and deformation trends were obtained. Secondly, the level measurement results at the same monitoring time were selected to verify with the PS points. The correlation between rainfall and slope deformation was analyzed by grey correlation. The monitoring results show that the slope settlement rate is concentrated in the range of 10.15~30.27 mm/a. The settlement analysis results show that the overall stability of the graben slope is relatively stable. With all-time, all-weather, all-dimension, and traceable relative level measurements, the time-series InSAR technology has feasibility and reliability in the excavated slopes of highways in mountainous areas, thus ensuring the safety and stability of the excavated slopes of highways.

**Key words:** road engineering; slope monitoring; small baseline subset interferometric synthetic aperture radar (SBAS-InSAR) technology; persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar (PS-InSAR) technology; settlement prediction; grey correlation analysis

收稿日期:2024-03-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51774204);辽宁省交通科技项目(202338)

作者简介:李如仁(1966—),男,山东泰安人,教授,博士生导师,主要从事时序 InSAR 地表形变监测研究。

苏宇祺(1990—),男,辽宁沈阳人,工程师,博士研究生,主要从事时序 InSAR 地表形变监测研究,本文通信作者。

E-mail:464840348@qq.com

在山区高速公路边坡施工中,采用有效方式监测边坡是评估边坡安全风险的关键。目前常采用形变监测与环境因素结合的监测方法<sup>[1]</sup>,分析不同环境对边坡形变的影响,为公路稳定与安全运行提供依据<sup>[2]</sup>。近年来,山体滑坡频发,国家对于边坡滑坡灾害防治工作高度重视,并发布了边坡滑坡灾害防治方案,公路路堑边坡的沉降监测与预警防治工作对于高速公路安全平稳运行至关重要。

常规精密水准和全球定位系统(global positioning system, GPS)监测手段可在一段时间内对特定区域进行形变监测,却不能对特征点进行连续监测和提取,难以准确反映边坡的形变趋势<sup>[3]</sup>,且传统人工测量需到边坡上方监测,具有较大安全风险。目前常用的时序 InSAR 技术有小基线集干涉合成孔径雷达(small baseline subset interferometric synthetic aperture radar, SBAS-InSAR)技术和永久散射体合成孔径雷达干涉测量(persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar, PS-InSAR)技术,其中 SBAS-InSAR 技术是一种先进的遥感技术,基于合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术发展而来,可降低时空相关性和大气干扰,并有效提高单视复数图像的使用效率。Ferretti 等<sup>[4]</sup>首次提出 PS-InSAR 技术,可有效消除空间失相干、大气等因素的干扰,并准确捕捉空间与时间维度的模型演化,进行大范围、高精度的边坡沉降监测<sup>[5]</sup>。近些年,许多工程实例均证明了时序 InSAR 技术的优势与便捷性<sup>[6-7]</sup>。目前时序 InSAR 技术被广泛应用于矿区监测,如陈娅男等<sup>[8]</sup>利用 SBAS-InSAR 技术精确监测卡房尾矿库地表的微小形变,并揭示了其形变的时空特征。

在高速公路路堑边坡形变监测领域,与传统的精密水准测量相比,时序 InSAR 技术的应用尚处于初级阶段,王君鹭等<sup>[9]</sup>基于 PS-InSAR 技术对黄土高边坡形变进行监测,并与人工水准测量对比,认为两种方式的监测形变数据较吻合,但部分水准点与 PS 点累计形变量的监测结果差异较大,原因是水准测量监测点与 PS 点并非同一监测对象。李升甫等<sup>[10]</sup>在复杂山区高速公路选线中,采用 InSAR 技术,结合水电站的蓄水水位数据,获取变形体的形变规律,为高速公路勘察设计中不良地质体的识别提供参考,但 InSAR 技术受观测目标特征及气候条件的影响较大。

为进一步探究 InSAR 技术在该领域的应用,本研究收集本桓高速公路本溪段高速路堑边坡 2023 年 4 月 11 日—2024 年 1 月 24 日的 22 景 Sentinel-1A 数据,运用高精度 SBAS-InSAR 和 PS-InSAR 技术,对路堑边坡的沉降量进行分析,通过在特征点布设角反射器,可保证水准测量与时序 InSAR 技术监测对象的一致性。将时序 InSAR 监测结果与该边坡特征点的人工精密水准监测结果进行对比显示,两种方法得到的形变趋势吻合,拟合度较高,验证了时序 InSAR 技术在公路边坡形变监测中的优势,可减少高边坡人工监测的风险。

## 1 本桓高速路堑边坡概况

研究区位于本桓高速桩号 K8+200 处,路堑边坡位于高速路线南侧,属中低山地貌,地势起伏较大,地形坡度为  $20^{\circ} \sim 65^{\circ}$ ,边坡分级 7 级,最大高差 56 m。地层以碎石为主,属岩土混合边坡,岩性主要为强风化和中风化变粒岩,且该段中风化、弱风化、微风化的石灰岩均呈块状结构,上覆盖层薄,主要安全隐患为岩石破碎引起的表面掉块或浅层滑塌破坏。该区地下水含量丰富,年平均降雨量为 1 100 mm,有潜在滑坡隐患。路堑边坡纬度为  $41^{\circ} 17' 54'' \sim 41^{\circ} 17' 54''$ ,经度为  $123^{\circ} 53' 25'' \sim 123^{\circ} 53' 27''$ 。本研究采用 22 景 Sentinel-1A 数据及 Version4 SRTM 数据获取数字高程模型(digital elevation model, DEM),研究区范围如图 1 所示。



图 1 研究区范围

Fig. 1 Scope of the study area

## 2 基于时序 InSAR 边坡沉降监测

### 2.1 SBAS-InSAR 的基本原理

SBAS-InSAR 技术是一种利用合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像进行地表形变监测的方法,适用于解决大气相位延迟和形变场空间变化较大的情况<sup>[11]</sup>。基本原理是通过构建一系列小基线干涉对,提高干涉相位相干性,以提高形变监测的精度及可靠性<sup>[12]</sup>。

通过设定连续时间框架( $t_0, t_1, \dots, t_N$ ),在同一研究区域获得  $N+1$  份 SAR 图像序列。从图像序列中选取一幅作为基准图进行精细校准,并在多个独立差分干涉图中选取符合预设的时空基线干涉对,生成  $M$  幅差分干涉图。 $M$  的确定需遵循以下筛选规则:

$$\frac{N}{2} \leq M \leq \frac{N \cdot (N-1)}{2} \quad (1)$$

式中: $N$  为研究区 SAR 影像的数量, $M$  为干涉图数量。

采用高通滤波与低通滤波,可有效抑制大气延时相位与噪声相位<sup>[13]</sup>。 $t_a$  与  $t_b$  ( $t_a < t_b$ ) 时刻生成的第  $j$  幅干涉图像,在去除平地效应与地形相位的影响后,方位向坐标以  $x$  表示,距离向坐标以  $y$  表示,干涉图像  $j$  中任意一点的相位可表示为:

$$\delta\varphi_j(x, y) = \varphi_{t_b}(x, y) - \varphi_{t_a}(x, y) \approx \frac{4\pi}{\lambda} \cdot (d_{t_b} - d_{t_a}) + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}} \quad (2)$$

式中: $\varphi_{t_a}(x, y)$ 、 $\varphi_{t_b}(x, y)$  分别为坐标  $(x, y)$  在  $t_a$ 、 $t_b$  时刻的差分相位; $\lambda$  为雷达波长; $d_{t_a}$ 、 $d_{t_b}$  分别代表  $t_a$  和  $t_b$  时刻该像素在雷达视线方向上的形变量; $\varphi_{\text{topo}}$ 、 $\varphi_{\text{atm}}$ 、 $\varphi_{\text{noise}}$  分别对应干涉图像中未消除的地形相位、大气延迟相位以及噪声相位。

该方法无需考虑大气滞后与噪声影响,只需采用高精度 DEM 即可对地面波相进行处理。时间序列上的相位值为:

$$\delta\varphi_j(x, y) \approx \frac{4\pi}{\lambda} \cdot (d_{t_b} - d_{t_a}) \quad (3)$$

式中: $\varphi_j(x, y)$  表示时刻  $j$  像素  $(x, y)$  的差分相位; $d_{t_b} - d_{t_a}$  代表时刻  $d$  像素  $(a, b)$  在雷达视线方向上的形变值。相位解缠后生成的所有差分干涉图可表示为:

$$\delta\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\varphi} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{A}$  为  $M \times N$  阶矩阵, $\boldsymbol{\varphi}$  是由所有原始数据相位值组成的向量, $\delta\boldsymbol{\varphi}$  是由相位解缠后的差分干涉图相位组成的向量。

当存在单一基线集时( $M \geq N$ ),可以通过最小二乘法求解  $\hat{\boldsymbol{\varphi}}$ ,

$$\hat{\boldsymbol{\varphi}} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \delta\boldsymbol{\varphi} \quad (5)$$

亏秩矩阵  $\mathbf{A}$  离散分布于若干基线集, $\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}$  为奇异矩阵,为获得唯一解,SBAS-InSAR 通过对多组解进行联合反演,在最小范数条件下获得最小二乘解,进而获得累积形变。

### 2.2 PS-InSAR 基本原理

PS 点作为时间域内永久散射体,表现出高度稳定性,其回波信号强度显著。PS-InSAR 技术通过对 PS 点进行相位分析与形变解析,分离出大气影响产生的相位延迟与残余高程信息,进而推算出精确地表形变参数。该方法旨在消除时间相关性和空间差异性造成的误差,并显著减小大气影响对地表形变测量的干扰,获取更为精准的地面形变数据与数字高程模型,提升数据的可靠性与精度<sup>[14]</sup>。

### 2.3 数据采集及处理

#### 2.3.1 数据预处理

本研究采集 2023 年 4 月 11 日—2024 年 1 月 24 日共 22 景 Sentinel-1A 卫星升轨数据(表 1)。所用的精轨数据由阿拉斯加卫星设备处(Alaska satellite facility, ASF)提供,应用精轨数据可有效去除影像数据轨道误差,并在监控区特征点埋置人工角反射器,利用该反射器可增强反射力度,区别于周边物体反射,提升监测精度。

本研究利用 SARscape 软件对 SAR 影像进行处理,采用 2023 年 4 月 11 日的影像作为基准影像,设置时间基线为 12 d,空间基线为基准基线的 60%,图 2 为时间基线分布图,该图体现了相邻两次 SAR 影像获取的时间差,横坐标表示时间轴,纵坐标表示时间基线相对位置,本研究选取的时间间隔足够小,因此不会显著影响干涉相位相干性的 SAR 影像对,可准确提取地表形变信息。图 3 为空间基线分布图,其中横坐标表示日期,纵坐标表示空间基线相对位置,图 3 体现了相邻两次 SAR 影像获取时卫星与地面之间的几何距离差异,是辅助筛选和组织干涉对的有效工具,以构建满足小基线集条件的数据子集。

表 1 研究区数据参数表

Table 1 Dataparameters for the study area

参数	Seninte-1A
极化方式	垂直-垂直同向极化
成像模式	干涉幅宽 (IW)
入射角度/(°)	39
雷达波长/cm	5.6
空间分辨率	5×20
重访周期/d	12
影像数量	22

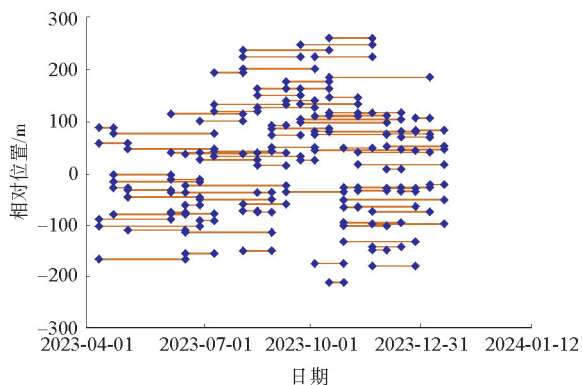


图 2 SBAS-InSAR 时间基线分布

Fig. 2 SBAS-InSAR time baseline distribution

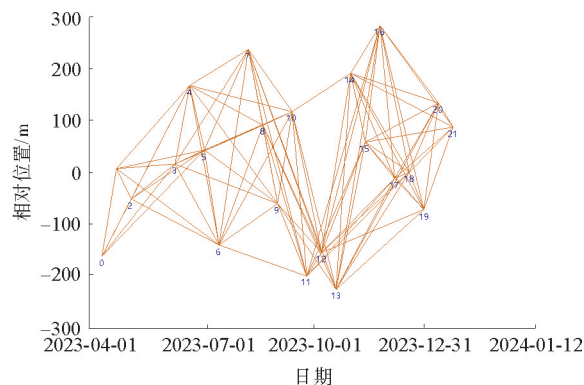


图 3 SBAS-InSAR 空间基线分布

Fig. 3 SBAS-InSAR spatial baseline distribution

2.3.2 差分干涉处理和相位解缠

本研究采用最小费用流法 (minimum cost flow, MCF) 进行相位解缠,并采用 Goldstein 滤波法对数据进行滤波处理,生成 39 对干涉影像对。将失相干较严重的干涉对剔除,选取部分干涉影响对生成差分干涉图像如图 4 所示,该干涉图反映了 2023 年 4 月—2024 年 1 月边坡相位的变化情况,并转换成地表垂直或水平方向上的微小形变信息,可以看出研究区路堑边坡出现显著形变干涉条纹。

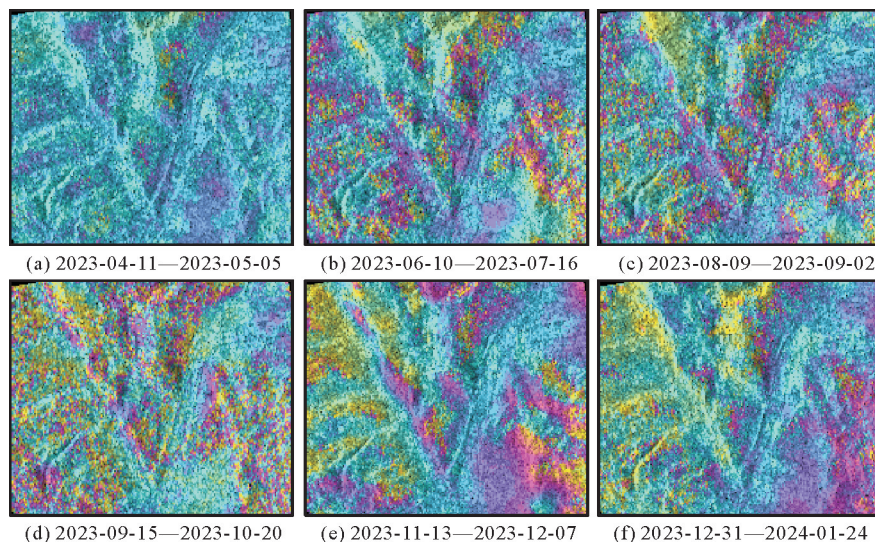


图 4 差分干涉结果

Fig. 4 Differential interference results

### 3 边坡形变特征分析

#### 3.1 数据采集及处理

监测得到本桓高速挖方边坡年形变速率如图 5 所示。图 5 中,正值表示地表抬升,即地面朝向卫星方向移动;负值表示地表下沉,即地面朝向远离卫星方向移动<sup>[15]</sup>。该路段总体沉降速率为 10.15~30.27 mm/a,其中东南部地区的沉降量最大,可达 50.23 mm/a。

本研究采用 PS-InSAR 与 SBAS-InSAR 技术结果进行相互验证,通过配准、PS 候选点选择、差分干涉等方法,获得每个差分干涉条纹上 PS 点的差分干涉相位集。在监测区域内提取 1 817 个 PS 点,其中监测边坡范围内 PS 点为 281 个,如图 6 所示,平均形变速率为 9.17~33.50 mm/a。

为直观地展示监测期间研究区时间与空间形变演变规律,绘制了边坡形变图(图 7)。如图 7 所示,高速边坡累计沉降量以 2023 年 4 月 11 日为基准,时间间隔设置为 12 d,研究区七级挖方边坡最大累计沉降量为 53.73 mm,截至 2023 年 12 月沉降速率呈明显下降趋势,沉降量渐趋稳定。

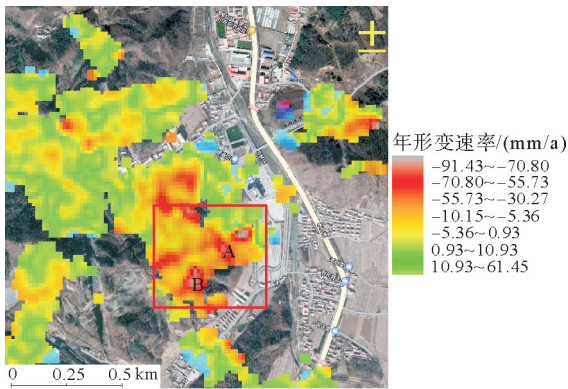


图 5 边坡年形变速率图

Fig. 5 Plot of annual rates of slope deformation

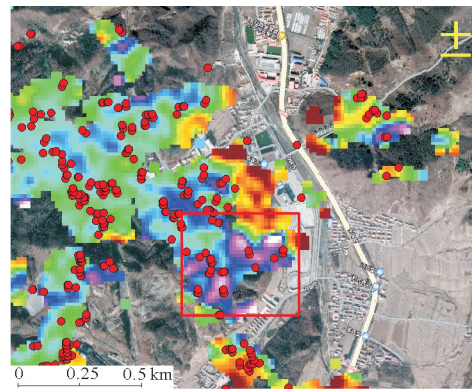


图 6 PS 点分布图

Fig. 6 Distribution of PS points

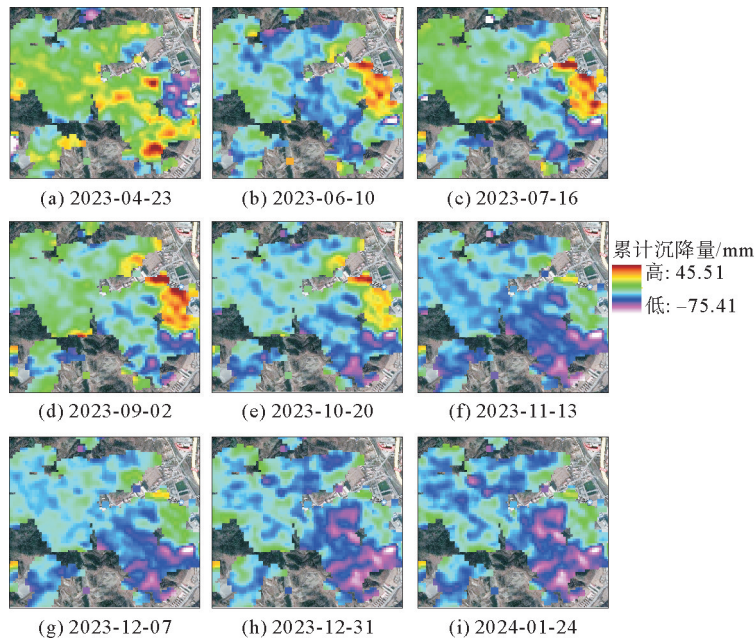


图 7 边坡时序累计形变图

Fig. 7 Time-series cumulative deformation map of slopes

由图 8 SBAS-InSAR 与 PS 点的累计形变量趋势图可以看出,SBAS-InSAR 与 PS-InSAR 的边坡形变在相同时间内整体沉降趋势保持一致。由图 9 PS 点平均形变速率范围图可以看出,261 个 PS 点的形变速率在  $-10 \sim 10$  mm/a, 占监测边坡全部 PS 点的 92.88%, 表明大部分 PS 点的形变速率较小, 与图 8 中 SBAS-InSAR 监测形变量在到达一定数值后趋于平缓的趋势相同, 验证了边坡整体形变较为稳定。

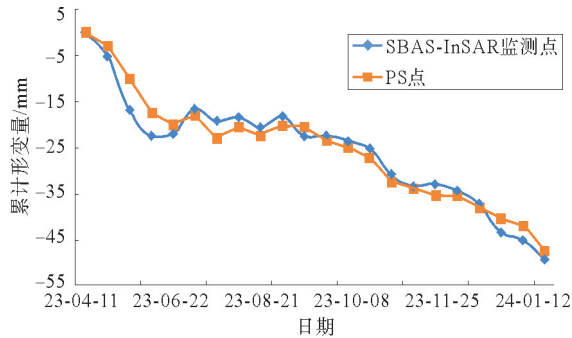


图 8 SBAS-InSAR 与 PS 点累计形变量趋势图

Fig. 8 Plot of SBAS-InSAR and PS point cumulative shape variable trends

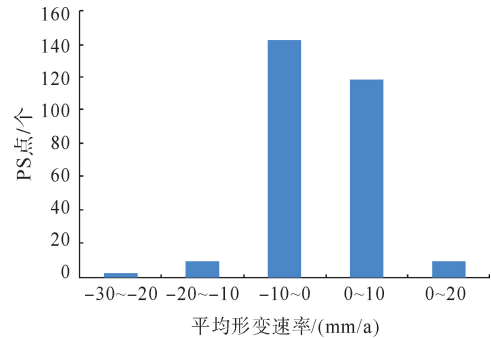


图 9 PS 点平均形变速率范围图

Fig. 9 Plot of average deformation rate range at PS points

### 3.2 时序 InSAR 与精密水准测量结果对比

相关研究表明<sup>[16]</sup>, 在典型形变区, 应力集中点的形变规律可较好地反映该区形变的总体趋势。为此, 本研究选取边坡区沉降较大的 A 点 ( $41^{\circ}18'1.08''N, 123^{\circ}53'11.30''E$ ) 和 B 点 ( $41^{\circ}18'1.14''N, 123^{\circ}53'11.48''E$ ) 为观测点, 选取 2023 年 4 月 11 日—2024 年 1 月 24 日分别对 A、B 两点进行时序 InSAR 数据与人工水准测量数据对比分析。参照人工水准测量时间, 同一时间 PS 点监控数据的对比结果如图 10 所示。

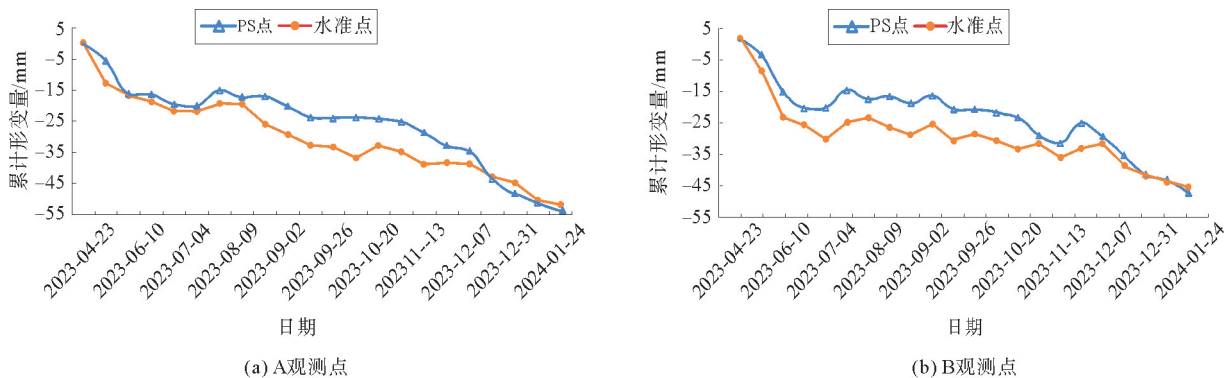


图 10 PS 点与水准点累计形变量对比图

Fig. 10 Comparison of cumulative shape variables of PS points and level points

由图 10 可以看出, PS 点与水准点的总体形变趋势保持一致, 且 A、B 观测点的总体形变量均不断增大, 2023 年 12 月沉降速率呈明显下降趋势, 且沉降量渐趋稳定。2023 年 4 月—6 月、2023 年 10 月—2024 年 1 月两种监测方式测量误差均小于 5 mm, 2023 年 6 月—10 月两种监测方式测量误差在 5 ~ 10 mm。A 观测点的平均绝对误差、均方根误差分别为 4.61、6.57 mm, B 观测点的平均绝对误差、均方根误差分别为 5.85、7.17 mm。PS 点与水准点两种方式形变趋势吻合, 且拟合度较高, 验证了时序 InSAR 技术在高速边坡形变监测中的可行性与可靠性。

通过实测数据分析表明, 该地区边坡总体稳定, 时序 InSAR 的观测值与人工水准测量值基本一致。由图 10 可以发现, 2023 年 6 月—9 月边坡形变量明显提高, 2023 年 4 月—6 月与 2023 年 10 月—2024 年 1 月

边坡形变量显著下降,变化周期与降水的发生时间一致。通过对边坡形变曲线微分,得到形变的周期性方向,说明其变化的影响因素是外界因素。因此,将其与监测期间的降雨量结合分析,得到形变周期项<sup>[17]</sup>,如图 11 所示。

由图 11 可知,坡面形变的周期性变化与降雨量呈明显的正相关性,2023 年 5 月—9 月,降雨量达到峰值,边坡形变的周期性显著加剧,其振幅高达 12.5 mm。2023 年 5 月雨季开始时,周期性变化曲线抬升;非雨季时,即 2023 年 10 月—2024 年 1 月,形变周期性波动则维持在 5 mm 的较小范围。原因是坡面主要由植物及腐殖土组成,雨季降雨大,岩石裂隙充满雨水,产生浮力,导致非饱和土吸水膨胀。结果表明,降雨量增加可使边坡结构性弱化,承载力和整体稳定性降低,边坡短时间内有明显的抬升趋势。当土壤含水量达到一定程度时,土壤总质量增大,沉降速率随之升高,且其变化规律与降雨强度密切相关。反之,随着降雨量的减少,地表水被消耗,斜坡的沉降率和起伏曲线均趋于平稳。

#### 4 灰色关联度分析

为准确分析边坡形变量与降雨量之间的关联,本研究通过灰色关联度分析,生成关联系数,并将边坡形变与降雨量线性拟合,建立相关性矩阵模型,再预测边坡形变与降雨量的关联性。

灰色关联度分析可对各种因素的主要特性进行分析,并对单因素或多因素影响下的相关性进行量化<sup>[18]</sup>。本研究根据边坡形变周期项与降雨量进行灰色关联度分析。由表 2 可知,2023 年 4 月—2024 年 1 月形变周期项与降雨量的平均关联度为 0.625 6,其中 7 月 16 日的关联系数最高,达 0.903 2。由图 12 形变周期项与降雨量线性拟合图、图 13 形变周期项与降雨量相关性矩阵图可知,边坡形变周期项与降雨量的相关性系数为 0.96,说明降水对边坡沉降的影响较大。

上述分析结果表明降水对边坡沉降有显著影响,故在降雨影响下,公路边坡存在失稳滑坡的风险,因此在雨季应增强边坡的主动防护措施,以减少边坡形变,降低滑坡风险。

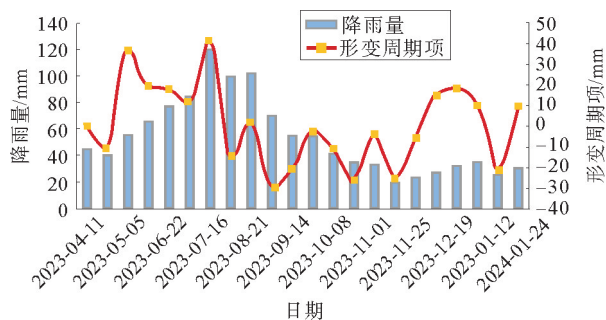


图 11 降雨量与边坡形变量关系图

Fig. 11 Relationship between rainfall and slope shape variables

表 2 灰色关联系数表

Table 2 Gray correlation coefficients

日期	均值化比较序列	均值化参考序列	差值序列	关联系数
2023-04-11	0.836 1	0	0.836 1	1.000 0
2023-04-23	0.743 2	61.809 5	62.552 8	0.679 2
2023-05-05	1.579 3	130.952 3	129.372 9	0.504 1
2023-06-10	1.217 0	57.619 0	56.401 9	0.701 6
2023-06-22	1.430 7	78.571 4	77.140 6	0.631 3
2023-07-04	0.622 4	-2.380 9	53.003 4	0.714 6
2023-07-16	0.882 6	15.714 2	14.831 6	0.903 2
2023-08-09	1.021 9	26.190 4	25.168 5	0.843 0
2023-08-21	0.994 0	31.428 5	30.434 4	0.815 3
2023-09-02	1.300 6	73.333 3	72.032 6	0.647 3
2023-09-14	0.436 6	-8.571 4	79.008 0	0.625 6
2023-09-26	0.436 6	78.571 4	79.008 0	0.625 6
2023-10-08	0.464 5	-9.047 6	89.512 1	0.595 7
2023-10-20	0.650 3	-2.857 1	63.507 4	0.675 8
2023-11-01	2.229 7	261.904 7	259.675 0	0.335 4
2023-11-13	1.858 1	209.523 8	207.665 7	0.387 1
2023-11-25	1.895 2	162.380 9	160.485 6	0.450 0
2023-12-07	0.501 6	-25.714 2	126.215 9	0.510 3
2023-12-19	0.594 5	-57.142 8	157.737 4	0.454 3
2023-12-31	0.650 3	-57.142 8	157.793 1	0.454 3
2024-01-12	0.510 9	-25.714 2	126.225 2	0.510 3
2024-01-24	0.557 4	-41.428 5	141.986 0	0.480 7

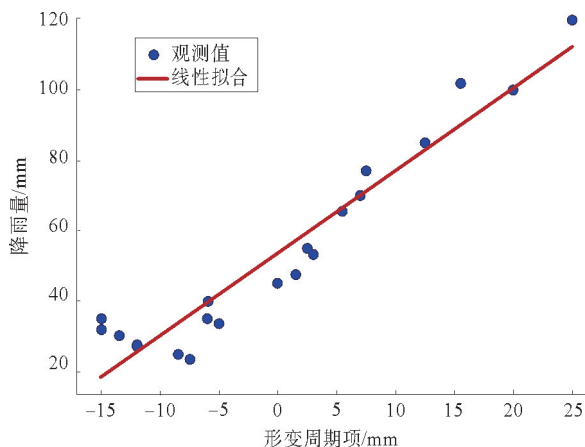


图 12 形变周期项与降雨量线性拟合图

Fig. 12 Linear fitting of deformation period terms to rainfall

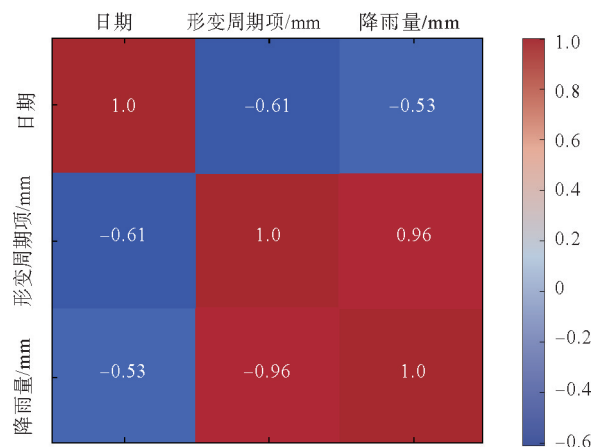


图 13 形变周期项与降雨量相关性矩阵图

Fig. 13 Correlation matrix of deformation period terms with rainfall

### 5 结论

1) 研究区挖方边坡最大累计沉降量为 53.73 mm,截至 2023 年 12 月沉降量渐趋稳定。时序 InSAR 监测与人工水准测量形变吻合,能准确反映沉降趋势且具有可回溯性,验证了时序 InSAR 技术在高速边坡形变监测中的可行性与可靠性,可持续跟踪边坡形变,记录沉降动态,便于时段性形变分析,强化滑坡预警,并为研究沉降规律和预测提供数据支持。

2) 灰色关联分析结果表明,降雨量与边坡形变关联度达 0.625 6,相关系数 0.96,表明二者高度相关。降雨量峰值时期,边坡形变加剧,易引发滑坡风险。

3) 本研究可实现边坡二维层状区域全天时、全天候监测与形变预测,可使边坡监测不受环境与天气影响,并解决人工监测安全风险等问题,但受制于时序 InSAR 对植被等观测目标失相干等的影响,后续工作中需结合高时空分辨率雷达获取边坡三维立体形变信息,进一步提升边坡监测与沉降预测精度。

### 参考文献:

[1] 王念泰,申辉辉,鲁兴生. 边坡变形监测技术发展现状及问题对策[J]. 科学技术与工程,2021,21(19):7845-7855.  
WANG Nianqin, SHEN Huihui, LU Xingsheng. Development status and problem countermeasures of slope deformation monitoring technology[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(19): 7845-7855.

[2] 凌建明,张玉,满立,等. 公路边坡智能化监测体系研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2118-2136.  
LING Jianming, ZHANG Yu, MAN Li, et al. Research progress on intelligent monitoring system for highway slope[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(7): 2118-2136.

[3] 陈洋,陶秋香,刘国林,等. InSAR 与概率积分法联合的矿区地表沉降精细化监测方法[J]. 地球物理学报,2021,64(10):3554-3566.  
CHEN Yang, TAO Qiuxiang, LIU Guolin, et al. Detailed mining subsidence monitoring combined with InSAR and probability integral method[J]. Chinese Journal of Geophys, 2021, 64(10): 3554-3566.

[4] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F, et al. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2202-2212.

[5] 肖海平,夏益强,刘小生,等. 融合 SBAS-InSAR 技术与 TSO-LSTM 模型的矿区地表沉降预测方法[J]. 金属矿山, 2023, 559(1):126-133.  
XIAO Haiping, XIA Yiqiang, LIU Xiaosheng, et al. Prediction method of surface subsidence in mining area by the integration of SBAS-InSAR technique and TSO-LSTM model[J]. Metal Mine, 2023, 559(1): 126-133.

[6] 魏恋欢,封秋月,毛亚纯,等. 基于多轨道 SBAS 方法的露天矿高陡边坡形变监测[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(10):1445-1451.



- WEI Lianhuan, FENG Qiuyue, MAO Yachun, et al. Deformation monitoring of high steep slope in open-pit mine with multi-orbit SBAS[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(10): 1445-1451.
- [7] 冯文凯, 顿佳伟, 易小宇, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的金沙江流域沃达村巨型老滑坡形变分析[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 384-393.
- FENG Wenkai, DUN Jiawei, YI Xiaoyu, et al. Deformation analysis of Woda village old landslide in Jinsha river basin using SBAS-InSAR technology[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 384-393.
- [8] 陈娅男, 李素敏, 郭瑞, 等. 基于时序 InSAR 的覆砂石尾矿坝形变演化研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(4): 31-37.
- CHEN Yanan, LI Sumin, GUO Rui, et al. Study on deformation evolution of sandstone-covered tailings dam based on time series InSAR[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(4): 31-37.
- [9] 王君鹭, 富志鹏. 基于 PS-InSAR 技术的黄土高边坡形变监测[J]. 公路交通科技, 2023, 40(11): 28-34.
- WANG Junlu, FU Zhipeng. Deformation monitoring of loess high slope based on PS-InSAR technology[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(11): 28-34.
- [10] 李升甫, 向波, 孙晓鹏, 等. 多源遥感技术在复杂山区高速公路地质选线中的应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(4): 120-125.
- LI Shengfu, XIANG Bo, SUN Xiaopeng, et al. Application of multi-source remote sensing technology in geological route selection of expressway in complex mountain area[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2022, 41(4): 120-125.
- [11] 靳立周, 王盈, 常文斌, 等. 基于 D-InSAR 和 PFC2D 技术的白格滑坡稳定性分析[J]. 地震地质, 2023, 45(1): 153-171.
- JIN Lizhou, WANG Ying, CHANG Wenbin, et al. Stability analysis of the Baige landslide using D-InSAR and PFC2D modeling[J]. Seismology and Geology, 2023, 45(1): 153-171.
- [12] 董继红, 张肃, 梁京涛, 等. 利用 Stacking/SBAS 技术在滇西北地区滑坡隐患的识别对比[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 21-31.
- DONG Jihong, ZHANG Su, LIANG Jingtao, et al. Comparison of landslide hazard identification in northwest Yunnan using Stacking/SBAS technology[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 42(4): 21-31.
- [13] 李如仁, 葛永权, 李梦晨, 等. 基于 InSAR-COMSOL 的露天矿边坡稳定性分析及形变预测[J]. 金属矿山, 2024, 573(3): 172-182.
- LI Ruren, GE Yongquan, LI Mengchen, et al. Stability analysis and deformation prediction of open-pit mine slopes based on InSAR and COMSOL[J]. Metal Mine, 2024, 573(3): 172-182.
- [14] KHAN R, LI H, AFZAL Z, et al. Monitoring subsidence in urban area by PSInSAR: A case study of Abbottabad city, Northern Pakistan[J/OL]. Remote Sensing, 2021, 13. DOI:10.3390/rs13091651.
- [15] 刘媛媛. 不同尺度综合地表形变 InSAR 时序监测与机理分析[J]. 测绘学报, 2020, 49(7): 935.
- LIU Yuanyuan. Research on the monitoring and inversion of different-scale complex surface deformation with multi-temporal InSAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(7): 935.
- [16] 张迪, 唐旭, 李玉豪. 基于 SBAS-InSAR 技术钢桁梁结构桥梁形变信息提取与分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(1): 10-17.
- ZHANG Di, TANG Xu, LI Yuhao. Extraction and analysis of deformation information of steel truss girder structure bridge based on SBAS-InSAR technology[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 42(1): 10-17.
- [17] 孟蒙, 陈智强, 黄达, 等. 基于 H-P 滤波法、ARIMA 和 VAR 模型的库区滑坡位移综合预测[J]. 岩土力学, 2016, 37(增2): 552-560.
- MENG Meng, CHEN Zhiqiang, HUANG Da, et al. Displacement prediction of landslide in Three Gorges Reservoir area based on H-P filter, ARIMA and VAR models[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 552-560.
- [18] 代劲, 胡峰, 刘歆. 基于数据分布的快速灰关联分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(1): 283-290.
- DAI Jin, HU Feng, LIU Xin. Novel rapid grey incidence analysis method based on data distribution[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(1): 283-290.

(责任编辑:高丽华)