引文格式：白维诚,韩森,刘洋,等. 利用SBAS-InSAR的黄土坡滑坡坡向形变研究[J]. 地理空间信息, 2026, 24(4):65-70. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.04.014

利用 SBAS-InSAR 的黄土坡滑坡坡向形变研究

白维诚[1,2]，韩　森[3]，刘　洋[1,2]，温扬茂[1,2]，刘佳亮[1,2]，李　陶[2,4]，许汉平[5]

（1. 武汉大学 测绘学院，湖北 武汉 430079；2. 湖北珞珈实验室，湖北 武汉 430079；
3. 北京航天长城卫星导航科技有限公司，北京 100053；4. 武汉大学 卫星导航定位技术研究中心，湖北 武汉 430079；
5. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院，湖北 武汉 430000）

摘　要：滑坡是我国山区常见的地质灾害之一，对人民生命财产安全和基础设施稳定构成严重威胁。以湖北省恩施州巴东县黄土坡滑坡为研究对象，基于2023年1月—2024年9月共35景Sentinel-1A升轨SAR影像，采用小基线集合成孔径雷达干涉测量（small baseline subset inSAR，SBAS-InSAR）技术对滑坡区进行形变监测与时序分析。通过构建小基线干涉对网络，提取沿视线（Line-of-sight，LOS）方向的形变速率（最大约为-22.3 mm·a^{-1}），并结合坡面投影方法获取沿坡向的形变速率（最大约为-52.5 mm·a^{-1}），最终对临江1#、临江2#、变电站滑坡和园艺场滑坡4个子滑坡体的15个特征点进行详细的时序变形分析。结果表明：研究区影像具有较高相干性，滑坡活动具有显著的空间差异性；降雨是滑坡加速的重要诱因，部分区域在2024年5月高降雨时期形变速率较大；15个特征点均表现出显著的形变活动。成果可为黄土坡滑坡的监测预警与灾害防控提供技术支持与决策依据。

关键词：黄土坡滑坡；形变监测；SBAS-InSAR；时序分析；滑坡坡向分析

中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）04-0065-06

Research on Slope Deformation of Huangtupo Landslide Based on SBAS-InSAR

BAI Weicheng[1,2], HAN Sen[3], LIU Yang[1,2], WEN Yangmao[1,2,] LIU Jialiang[1,2], LI Tao[2,4], XU Hanping[5]

(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430079, China;
3. Beijing Aerospace Great Wall Satellite Navigation Technology Co., Ltd., Beijing 100053, China;
4. Research Center for Satellite Navigation and Positioning Technology, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
5. Economic and Technical Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: Landslides are among the most prevalent geological hazards in China's mountainous regions, posing serious threats to human safety and infrastructure stability. In this study, we investigated the Huangtupo landslide in Badong County, Hubei Province, using 35 ascending Sentinel-1A SAR scenes acquired between January 2023 and September 2024. We used the small baseline subset interferometric synthetic aperture radar (SBAS-InSAR) technique to monitor surface deformation and analyze time series trends across the landslide area. Line-of-sight (LOS) deformation rates (maximum approximately -22.3 mm/a) were derived from an interferometric network constructed with small baseline pairs, and slope-parallel deformation rates (also up to -52.5 mm/a) were further calculated using terrain projection methods. We conducted detailed time series deformation analysis on 15 representative points within four major landslide bodies, including Linjiang 1#, Linjiang 2#, the substation landslide, and the horticultural farm landslide. The results reveal high image coherence and clear spatial variation in landslide activity. Intense rainfall, particularly in May 2024, is identified as a key triggering factor for accelerated movement in certain zones. All selected points exhibited significant deformation over time. These results can provide technical support and decision-making basis for monitoring, warning, and disaster prevention and control of Huangtupo landslide.

Key words: Huangtupo landslide, deformation monitoring, SBAS-InSAR, time series analysis, landslide slope analysis

合成孔径雷达（SAR）是一种主动遥感技术，其干涉测量技术（InSAR）可实现毫米级大范围地表形变监测。近年来，时序 InSAR 技术如 SBAS-InSAR 和 PS-InSAR 在滑坡识别与演化过程监测中应用广泛[1-3]。传统差分干涉测量（D-InSAR）在缓慢变形区域受时间去相干等因素影响，应用受限。SBAS-InSAR 通过构建小基线干涉对网络，提高了形变监测的时效性与稳定性，适用于滑坡等地质灾害的长期形变监测[4-8]。现有研究多聚焦于形变速率场提取与整体趋势分析，对子滑坡体细节演变过程等探讨不足，且巴东县黄土坡滑坡的最新形变演变规律连续监测与系统分析缺乏。本文以巴东县黄土坡滑坡为研究区，基于

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42474003、42374003）；湖北省重点研发计划项目（2023BCB120）。
第一作者简介：白维诚（2000—），硕士研究生，研究方向为InSAR数据处理及应用，E-mail：1602240303@qq.com。
通信作者：刘洋（1984—），博士，副教授，研究方向为InSAR数据处理与地学解释，E-mail：Yang.Liu@sgg.whu.edu.cn。

2023年1月—2024年9月的35景Sentinel-1A升轨SAR影像数据，采用SBAS-InSAR技术提取雷达视线向形变速率场，通过坡面投影获得坡向形变，选取15个形变显著的典型点位分析其时序形变规律。

1 研究区域概况

巴东县隶属湖北省恩施土家族苗族自治州，地处湖北西南部、长江中上游流域，总面积3 351.6 km²，地形复杂，属亚热带季风气候，年均降水量约1 600 mm，降水集中于4—9月。巴东县因山高坡陡、地质结构复杂，是全球少见的地质灾害高发区，县内地质灾害点多达1 200余处，其中典型的滑坡体有黄土坡滑坡体（如图1）。

黄土坡滑坡体积近7.00×10^7 m³，覆盖面积约1.35 km²，由变电站滑坡、园艺场滑坡、临江1#和临江2#组成。滑坡区南高北低，地层以“三叠统巴东组”为主，地质构造复杂，存在软弱岩层及断层破碎带，导致滑坡体稳定性较差[9]。频繁降水、河流切割及人类活动是区域滑坡频发的重要诱因[10-11]。

临江1#和临江2#体积分别约为2.25×10^7 m³和1.99×10^7 m³，前缘均位于175 m水位以下，主要由碎石土和块石土组成。变电站滑坡体积约1.33×10^7 m³，前缘高程160~200 m，后缘高程达600 m。园艺场滑坡体积约1.35×10^7 m³，前缘高程220~240 m，后缘高程约520 m。滑坡体之间存在明显的叠置关系，其中变电站滑坡前缘覆盖于临江2#后缘高程201~250 m左右，园艺场滑坡前缘北东侧覆盖于变电站前部，而北西侧位于临江1#上，前缘高程集中在220~240 m，后缘高程约520 m[12]。

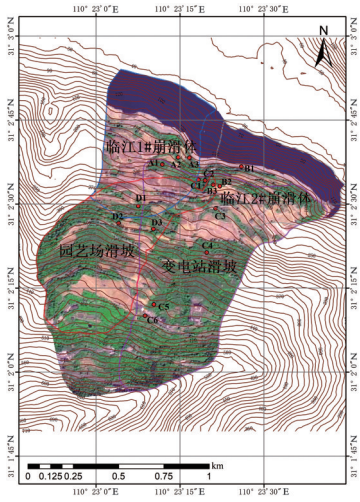


图1 巴东黄土坡滑坡地理概况及研究点位

2 地表形变数据处理

2.1 SBAS-InSAR方法

SBAS-InSAR是由Berardino等[13]于2002年提出的一种时序InSAR技术。通过选取小时空基线的SAR数据子集，结合奇异值分解（singular value decomposition，SVD）方法，克服长基线引起的失相干问题，从而增加干涉对的数量和质量[14-15]。具体流程如下：

研究区域的$N+1$幅影像按时间顺序$t_0,\dots,t_n$排列，选取一幅影像作为主影像，其余影像与主影像进行配准，然后按照一定的准则（时空基线小于阈值）生成M幅差分干涉图，且满足：

$$\frac{N+1}{2}\ll M\ll\frac{N(N+1)}{2} \tag{1}$$

通过在2个不同时间t_A和$t_B(t_B>t_A)$获取的副影像和主影像生成第j景差分干涉图，位于（x，r）处的干涉相位为：

$$\delta\varphi_j(x,r)=\varphi_B(x,r)-\varphi_A(x,r)\approx\frac{4\pi}{\lambda}[d(t_B,x,r)-d(t_A,x,r)]+\Delta\varphi^j_{\text{topo}}(x,r)+\Delta\varphi^j_{\text{atmo}}(x,r)+\Delta\varphi^j_{\text{noise}}(x,r) \tag{2}$$

式中，$j\in(1,\dots,M)$；λ为雷达信号中心波长；$d(t_B,x,r)$和$d(t_A,x,r)$为t_B和t_A时刻相对于t_0时刻雷达方向的形变量；$\Delta\varphi^j_{\text{topo}}(x,r)$为地形相位，$\Delta\varphi^j_{\text{atmo}}(x,r)$为大气延迟相位；$\Delta\varphi^j_{\text{noise}}(x,r)$为噪声相位。当忽略地形相位、噪声相位及大气延迟相位等因素时，可将式（2）简化为：

$$\delta\varphi_j(x,r)=\varphi_B(x,r)-\varphi_A(x,r)\approx\frac{4\pi}{\lambda}[d(t_B,x,r)-d(t_A,x,r)] \tag{3}$$

用矩阵形式表示为：

$$\delta\varphi=\boldsymbol{A}\varphi \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{A}$为$M\times N$大小的矩阵。采用SVD方法[16]求出最小二乘解，有效解决秩亏问题，得到最终的形变速率场。

2.2 SBAS-InSAR数据处理

研究选取2023年1月—2024年9月的35景覆盖研究区的Sentinel-1A影像，轨道号为T084，数据类型为干涉宽幅模式（IW）的单视复数（SLC）数据，VV极化方式，分辨率为5 m×20 m，幅宽为250 km，工作波段为C波段，波长为5.6 cm[17-18]。研究中设置时间基线阈值为100 d、空间基线阈值为3%，生成了时空基线图（如图2），共生成148个干涉对。空间基线阈值为相对于系统临界基线的比例限制，用以筛选空间基线较小、相干性较高的图像对。临界基线（B_{Crit}）表示在给定雷达参数和成像几何条件下所允许的最大空间基线长度，超过该值将导致严重空间去相干。根据Sentinel-1A雷达系统参数（波长0.056 m，距离向分辨率5 m，轨道高度约720 km）计算，临界基线约为4 032 m，因此所设3%空间基线阈值对应的最大允许

空间基线长度约为121 m。在时空基线构网过程中，2024年3—7月期间图像间构成的干涉对难以满足预设的时空基线阈值条件。其受季节性大气湿度增强、植被变化等因素影响，夏季影像的相干性普遍低于冬季，导致生成的干涉图质量不佳。为确保数据处理精度与可靠性，最终剔除了该时段的部分影像节点与干涉连接，致使在图1中该时段出现时空基线空窗。

在干涉处理过程中，多视比设定为5∶1，相位解缠阈值为0.3，这表示只在相干系数大于等于0.3的像素上进行解缠，排除噪声较大的区域，提升解缠可靠性。利用30 m分辨率数字高程模型（digital elevation model，DEM）对地形相位进行估算与剔除，采用Goldstein方法进行干涉图滤波，引入GACOS外部大气数据去除大气相位[19]，并采用MCF方法进行相位解缠。最后对解缠相位进行时间序列反演，得到高精度地表形变时间序列。

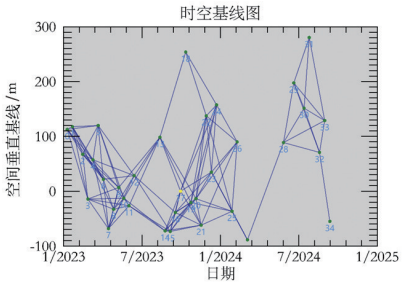


图2　时空基线图

2.3　LOS向形变速率转换至滑坡向形变速率

滑坡体通常受重力应力作用沿坡面方向下滑，InSAR技术仅能获取LOS向形变。因滑坡坡向和坡度各异，因此将LOS向形变速率投影至坡面方向以准确反映滑坡运动特征，为力学分析和滑坡演化研究提供基础物理信息[20]。

在雷达拍摄瞬间，以雷达位置O为中心建立NEU坐标系，其中U方向垂直于地球参考椭球面，N指向北，E方向垂直于UON平面，卫星的飞行方向在NOE平面。雷达波束在NOE平面上的垂足记为m。为了分析滑坡向形变，将该坐标系平移到滑坡位置得到N′O′E′坐标系（图3）。

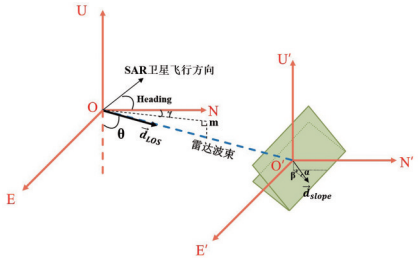


图3　雷达视线向（LOS）与滑坡向几何关系示意图

在升轨条件下，设雷达视线方向与坡度方向的形变分别为单位向量 $\vec{d}_{LOS}$ 和 $\vec{d}_{slope}$。为分析视线方向和坡度方向之间的关系，需将上述2个向量分别投影到NEU坐标的3个方向，得如下分量：

$$\vec{d}_{LOS}=(\sin\theta\cos\gamma,\sin\theta\sin\gamma,-\cos\theta) \tag{5}$$

$$\vec{d}_{slope}=(\cos\alpha\sin\beta,\cos\alpha\cos\beta,-\sin\alpha) \tag{6}$$

式中，θ 为雷达视角；γ 为雷达波束在NOE平面上投影与N方向的夹角（与雷达的飞行方位角Heading互为余角，Heading可从影像参数文件中获取）；α 为坡度角，为坡度方向与N′O′E′水平面之间的夹角；β 为坡向角，表示坡度方向在N′O′E′平面内的投影与北向N′的夹角；α 和 β 可以通过DEM数据计算得到。

视线方向与坡度方向的夹角 φ 的余弦值（即二者之间的转换因子）可由以下公式计算：

$$\cos\varphi=\frac{\vec{d}_{LOS}\times\vec{d}_{slope}}{|\vec{d}_{LOS}|\times|\vec{d}_{slope}|} \tag{7}$$

将上式展开代入各向量的分量，得到：

$$\cos\varphi=\sin\alpha\cos\theta+\cos\alpha\cos(\gamma-\beta)\sin\theta \tag{8}$$

通常 $\cos\varphi\in(0,1)$，但由于 β 在0~360°之间分布，某些情况下 $\cos\varphi$ 可能趋近于0或为负。为确保坡向形变转换的有效性，设置阈值为0.3[21]，仅对满足 $\cos\varphi>0.3$ 的点进行转换。

视线方向形变速率 V_{LOS} 与坡度方向形变速率 V_{slope} 之间的关系为：

$$V_{slope}=\frac{V_{LOS}}{\cos\varphi}\ [22] \tag{9}$$

本研究利用DEM提取转换因子并生成全区域转换因子，然后根据式（2、3、5）计算得到滑坡向形变速率及形变时间序列。

3　结果及分析

3.1　巴东县黄土坡滑坡形变

SBAS-InSAR结果显示，影像相干性较好，整个研究区存在不均匀地表形变，4个子滑坡体均存在不同程度的形变（图4a）。临江1#、临江2#、变电站及园艺场滑坡的LOS向形变速率分别为-22.3 ~ 15.0 mm·a^{-1}、-13.6 ~ 19.6 mm·a^{-1}、-27.6 ~ 20.6 mm·a^{-1} 和-21.3 ~ 17.3 mm·a^{-1}。经实地踏勘并与形变速率图相比较，居民区的形变速率较稳定，统计结果在-5.0 ~ 5.0 mm·a^{-1}。形变速率达-20.0 mm·a^{-1}的高值形变区域主要分布在各子滑坡体的特征点处。

通过坡度和坡向信息，提取坡向形变速率，并将

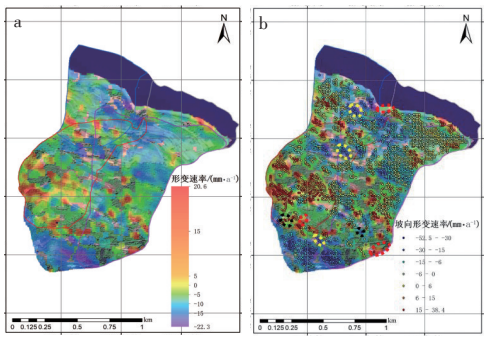


图4　滑坡区LOS与坡向形变速率图

注：图4a为LOS向形变速率图，色带从蓝紫色（负值）到红橙色（正值），表示形变速率从负值到正值的变化。红色与橙色区域表示形变速率较大的正值，绿色为变化较小区域，蓝色与紫色则代表速率较大的负值。图4b为坡向形变速率图，采用圆点颜色标识速率区间，颜色从蓝色（负值）过渡到红色（正值），中间的绿色和黄色区域代表较小或接近于零的形变速率）

其与LOS方向的形变速率叠加分析（图4b），可直观识别出无法有效投影的区域，并据此进行掩膜处理。将坡度与坡向分析引入InSAR数据处理流程，有助于辅助判断形变结果中的异常值或不合理区域。例如，在图4b红圈所示区域，通过对比分析有效剔除了部分异常值；黄圈区域中，坡向形变速率不如LOS结果所示那样显著；而在黑圈区域，实际存在较大的形变速率，但在LOS结果中未能明显反映。这些差异说明，仅依赖LOS结果存在一定局限，坡向形变速率可作为识别真实形变特征的重要补充。同时，记录各特征点的坡向形变速率值（见表1）。

3.2　巴东县黄土坡滑坡坡向时空特征分析

3.2.1　临江1#崩滑体

对临江1#选取了A1、A2和A3三个监测点进行时序分析，分别沿垂直于等高线方向等间距选取多个点（如图5）。结果显示，3个监测点中各点在整个时间段

表1　各点位LOS向及滑坡向形变速率

点名	LOS向形变速率/mm·a⁻¹	坡向形变速率/mm·a⁻¹	坡度/(°)	坡向/(°)
A1	−16.8	−40.6	13.6	30.8
A2	−14.3	−29.8	18.5	54.0
A3	−19.9	−32.3	28.6	61.4
B1	−8.0	−11.7	32.9	13.9
B2	−14.6	−22.4	30.8	8.1
B3	−13.2	−22.6	26.0	8.1
C1	−13.6	−28.2	29.0	305.5
C2	−16.2	−38.1	26.3	298.9
C3	−13.6	−34.9	13.5	4.5
C4	−15.8	−35.2	17.1	7.6
C5	−19.2	−41.4	17.1	19.0
C6	−16.3	−54.1	7.6	10.3
D1	−17.2	−31.8	21.9	26.2
D2	−18.7	−36.1	20.4	24.3
D3	−19.2	−41.2	17.1	22.1

内形变趋势基本一致，整体呈下降趋势，表现出较明显的滑动特征。A1监测点在2024年8月31日达到最大形变量−70 mm，随后至9月12日出现小幅回升，最终累计形变量为−69 mm。2023年3月底至9月中旬，形变速率较为平缓且趋势一致，沿坡面方向形变量逐渐增大。2024年2—6月形变速率显著加快，滑动增强。A2位于靠近沿江大道王家滩大桥南侧，2024年9月12日达到最大形变量−53 mm，形变过程稳定，2024年2—6月速率明显上升。A3与A2位置相近，最大形变量出现在2024年8月31日为−58 mm，最终累计为−56 mm，2023年10—11月形变速率波动，上部形变量大于下部，滑动趋势明显。结合月降雨数据分析，虽然2023年降雨量偏多，可能因滑坡体尚具一定抗剪强度，未发生显著滑动；而2024年初至6月降雨量达峰值，可能超过其抗剪强度，诱发滑坡加速变形[23]。自2024年7月起，三处监测点形变速率趋于平稳，整体滑动活动减弱。

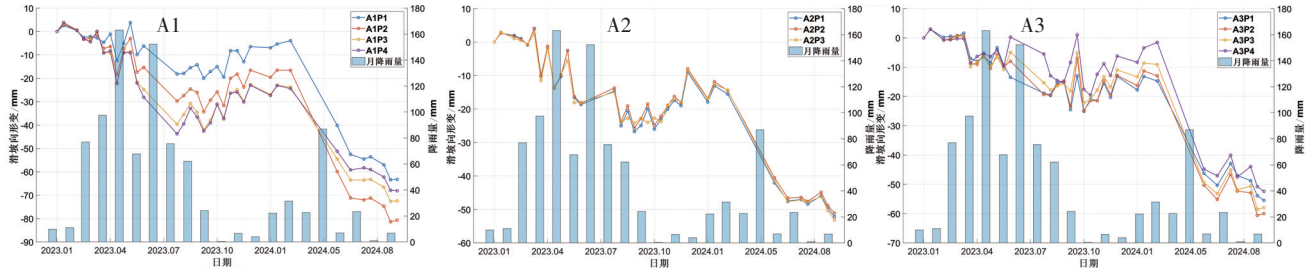


图5　A1、A2和A3处滑坡向时序分析图

3.2.2　临江2#崩滑体

对临江2#选取了B1、B2和B3三个监测点进行时序分析，分别位于前缘及中段西侧区域，垂直于等高线方向等距离选取点（如图6）。B1位于滑坡体前缘，坡度达33°，为极陡坡，但结果显示形变速率较低，总形变量为−22 mm，且与同期降雨量的相关性较弱，表明该区域目前处于相对稳定状态。B2和B3均位于滑坡体中段西侧，沿等高线垂直方向各选取3个点开展时序分析，监测结果显示两处形变趋势较为一致，整体呈缓慢下降趋势，最大形变量均于2024年9月12日达−40 mm，累计形变量亦一致。2023年7月—2024年2月期间，滑坡体整体缓慢蠕滑，推测处于应力积

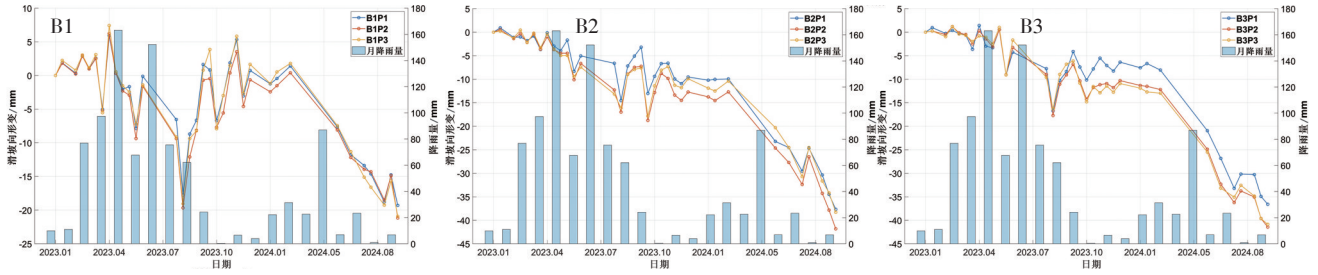


图6　B1、B2和B3处滑坡向时序分析图

累阶段。自2024年初起，滑动活动明显加剧，表明滑带内累积应力逐步达到临界状态并开始释放，引发滑动速率显著提升。结合2024年9月实地踏勘发现，B2和B3所在区域已出现明显滑坡迹象，地表多处破裂，部分路面出现断裂现象。由于2个点位分布在同一滑坡水平剖面但相距较远，推测该区域属于规模较大的滑坡体，具有一定的整体滑动特征，需持续重点监测。

3.2.3　变电站滑坡

对变电站滑坡选取了6个监测点（C1~C6）进行时序分析，覆盖前缘、中段及后缘区域（如图7）。C1位于平湖路，滑坡体中上段，沿等高线垂直方向选取3个点，形变趋势基本一致，总体呈下降态势。2024年1月后，形变速率明显增加，推测与强降雨相关。C1P1位于较高处，于2024年8月31日出现最大形变量，达-45 mm，并在8月底至9月中旬有小幅回升，而C1P2和C1P3最大形变量分别达-55 mm和-54 mm，表明下部形变更为剧烈，可能为整体下滑趋势[24]。C2位于C1东侧同一滑坡体中段，沿等高线垂直方向选取5个时序分析点。5个点形变趋势一致，最大形变量于2024年9月13日达到-70 mm。C1与C2区域形变特征相近，表明二者可能属于滑坡体东西侧的连续结构。C3位于柳荫路，同样选取5个时序分析点。监测数据显示，该区域形变最为显著，最大形变量达-65 mm。C3P1至C3P4形变曲线平行，速率接近，表现为整体滑移。C4位于滑坡体植被覆盖区，2023年6—10月，形变速率显著增加。后于2023年10月—2023年11月下降并趋于稳定，至2024年7月再度抬升并发生沉降。C5位于寇公路北侧滑坡体后缘，最大形变量达-74 mm。2024年7—9月经历2次明显沉降过程，可能由2024年7月连续暴雨冲刷诱发，致使G348武大线K568+200-300处（信陵镇黄土坡七公里)路基下沉(长65 m、宽7 m，高5 m)。C6位于寇公路南侧同属滑坡后缘区域，最大形变量达-100 mm。虽形变剧烈，但实地照片显示道路及建筑未受破坏。该处已修建滑坡防护墙，表明工程措施对减缓滑坡具有显著效果。

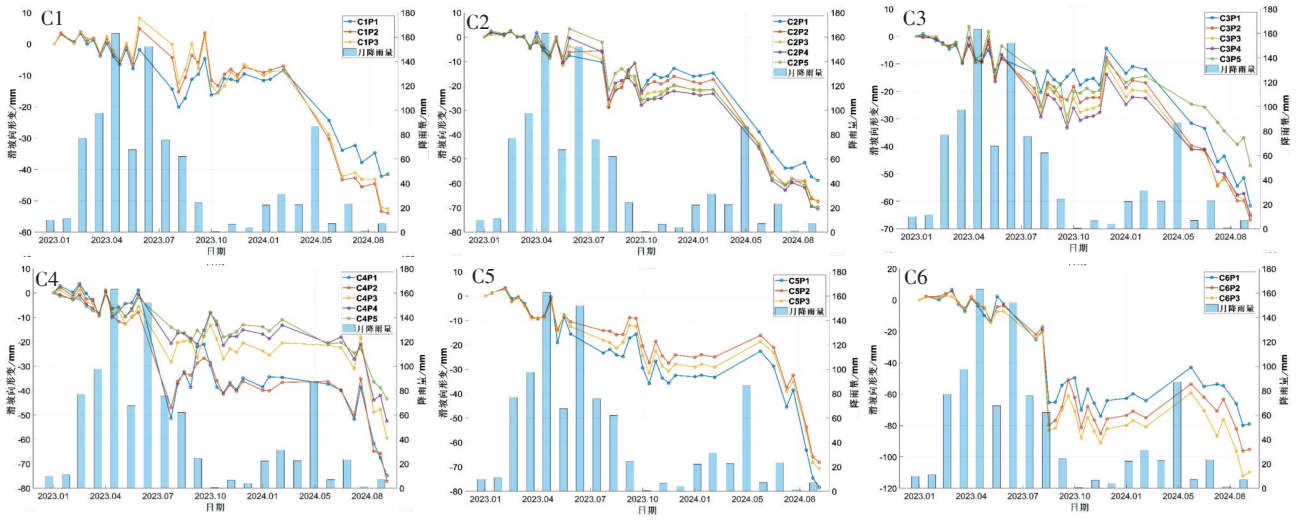


图7　C1、C2、C3、C4、C5和C6处滑坡向时序分析图

3.2.4　园艺场滑坡

对园艺场滑坡选取了3个监测点进行形变时序分析：①园艺场滑坡前缘。监测数据显示，2023年1—3月期间滑带相对稳定，自2024年4月—2023年12月间出现多次小幅抬升与沉降。2024年1—5月，形变速率显著增加，6—7月进一步加剧，与同期强降雨过程高度吻合。②滑坡体前缘，邻近柳荫路北侧。累计形变量达-60 mm，监测期间多次出现正负值交替变化。2023年6—8月间，高处点位负值形变，而低处点位则表现为正值形变，表现出局部差异性滑动。

2024年初至中期，形变速率加快，推测与该阶段强降雨密切相关。③邻近柳荫路北侧，滑坡体前缘东侧，趋势与②基本一致，推测两者属同一滑坡系统。2024年2—6月期间，高位点形变速率明显加快，显示出形变速率自上而下递减的趋势。

4 结 语

本研究利用2023年1月—2024年9月的35幅哨兵一号影像数据及SBAS-InSAR技术，对黄土坡滑坡进行监测分析。临江1#的3个特征点整体下降，2024年2—6月降雨致滑带形变速率加快，7—9月趋于平稳，A3区域上部形变速率高于下部；临江2#中，B1位于滑坡体前缘，形变速率低，B2和B3处同一滑坡水平剖面，总形变量均为-40 mm，蠕滑阶段；变电站滑坡6个特征点整体下降，C1和C2处同一滑坡体东西侧，C3协同滑动，C4植被覆盖区形变速率先降后稳，C5和C6为滑坡体后缘，形变剧烈；园艺场滑坡前缘监测点受降雨影响大，相邻位置的形变特征相似，推测处同一滑坡体东西向水平剖面。

参考文献

[1] Massonnet D, Feigl K L. Radar Interferometry and Its Application to Changes in the Earth's Surface[J]. Reviews of Geophysics, 1998, 36(4): 441-500

[2] Han P, Yang X, Bai L, et al. The Monitoring and Analysis of the Coastal Lowland Subsidence in the Southern Hangzhou Bay with an Advanced Time-series InSAR Method[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 36(7):110-118

[3] 彭颖,许才军,刘洋. 联合地震位错模型和InSAR数据构建2017年九寨沟Mw 6.5地震同震三维形变场[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(11):1896-1897

[4] 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

[5] 郑岳泽. InSAR技术在三峡库区滑坡监测中的应用研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019

[6] 何丽,吴先谭,陈欣,等. 基于SBAS-InSAR的西宁市滑坡识别和形变监测分析[J]. 物探化探计算技术,2023,45(6):812-823

[7] 娄连惠,刘强,谭玉敏. 基于时间序列InSAR的巴东地表形变分析[J]. 长江科学院院报,2021,38(5):149-152

[8] 马思捷,李陶,刘杰,等. Sentinel-1卫星监测黄土坡滑坡体散射体变形[J]. 测绘科学,2022,47(1):95-101

[9] 张洁,曾金明,胡其志,等. 基于流固耦合理论的巴东黄土坡滑坡地震响应研究[J]. 大地测量与地球动力学,2023,43(10):1051-1055,1067

[10] 唐辉明,鲁莎. 三峡库区黄土坡滑坡滑带空间分布特征研究[J]. 工程地质学报,2018,26(1):129-136

[11] Li Y N, Wang Y W.Triaxial Test of Sliding Zone Soil with Natural Grain Size Composition in Riverside Slumping Mass II[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science),2018,37(4):130-135

[12] 谢连平. 三峡库区黄土坡滑坡复杂地质结构特征及其形成机理与防治技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2009

[13] 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

[14] 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

[15] Usai S. A New Approach for Long Term Monitoring of Deformations by Differential SAR Interferometry[D]. Delft: Delft University of Technology, 2001

[16] 欧阳梓铭,左小清,李勇发,等. 基于SBAS-InSAR技术的阿海电站滑坡形变监测可靠性分析[J]. 大地测量与地球动力学,2023,43(11):1117-1122

[17] 曹淑敏,肖恭伟,辛锴. 基于PS-InSAR和SBAS-InSAR技术的北京地区地面沉降对比分析[J]. 测绘与空间地理信息,2016,39(10):40-42

[18] 张香凝,贺黎明,刘翠芝,等. 基于SBAS-InSAR技术的煤矿开采沉陷监测与分析[J]. 遥感技术与应用,2022,37(4):1021-1028

[19] 杨文韬,刘国林,牛冲,等. GACOS的SBAS-InSAR小尺度大气延迟改正及沉降监测[J]. 测绘科学,2023,48(6):73-81

[20] 彭凤友. 基于多源SAR数据的三峡库岸典型滑坡形变提取与时序分析研究[D]. 武汉:武汉大学,2020

[21] Herrera G, Gutiérrez F, García-davalillo J C, et al. Cooksley Multi-sensor Advanced DInSAR Monitoring of Very Slow Landslides: The Tena Valley Case Study (Central Spanish Pyrenees) [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 128, 31-43

[22] Tantianuparp P, Shi X, Zhang L, et al. Characterization of Landslide Deformations in Three Gorges Area Using Multiple InSAR Data Stacks[J]. Remote Sensing, 2013, 5(6):2704-2719

[23] 牛敏杰,师芸,吕杰,等. 基于SBAS-InSAR技术的广安村滑坡形变监测分析[J]. 地理空间信息,2023,21(1):79-84

[24] 刘排英,贺少帅,王鹏生,等. 基于升降轨Sentinel-1A SBAS InSAR的西南山区滑坡隐患早期识别研究[J]. 大地测量与地球动力学,2022,42(9):892-897