

结合人工角反射器的时序 InSAR 技术在黄土区域地质灾害监测中的应用

晋玉洁¹ 崔丽¹ 董元帅¹ 赵力国² 李震²

1 中咨数据有限公司 2 中交第一公路勘察设计研究院有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v8i5.2316

[摘要] 黄土区地质结构疏松,含水量变化与工程扰动常共同触发滑坡与路基沉降,让地表形变监测长期面临相干性差、点位稀疏等难题,依托人工角反射器的稳定散射特性,并联合时序InSAR构建监测体系,不但可增强低相干区的有效点密度,还可让剖面形变序列保持更连续、更可判读。角反射器的布设位置与朝向按照坡体结构和道路几何特征实施,使其在雨季、干湿转换等动态环境下仍保持清晰回波,实测结果显示,角反射器在高边坡与沉降段均能显著降低序列噪声,使关键加速点更早显形,为黄土区地表形变前兆识别与路基沉降诊断提供更可靠的数据基础,并为后续预警体系夯实基础。

[关键词] 时序InSAR; 人工角反射器; 黄土地区地质灾害; 形变监测

中图分类号: P5 文献标识码: A

Application of Time-Series InSAR Technology Combined with Artificial Corner Reflectors in Geological Hazard Monitoring in Loess Areas

Yujie Jin¹ Li Cui¹ Yuanshuai Dong¹ Ligu Zhao² Zhen Li²

1 China Consulting Data Co., Ltd.

2 CCCC First Highway Consultants Co., Ltd.

[Abstract] The loess region is characterized by a loose soil structure, where variations in moisture content and engineering disturbances often activate both landslides and roadbed settlement, making surface deformation monitoring vulnerable to poor coherence and sparse observation points. By integrating the stable scattering characteristics of artificial corner reflectors with time-series InSAR, the monitoring framework not only increases the density of effective targets in low-coherence areas but also enables deformation profiles to remain more continuous and interpretable. The placement and orientation of the reflectors are designed in accordance with slope geometry and highway structural features, allowing them to maintain strong backscatter under dynamic conditions such as rainfall and wet-dry transitions. Results show that the reflectors significantly reduce time-series noise on high cut slopes and settlement sections, allowing critical acceleration signals to emerge earlier. This combined approach provides a more reliable data foundation for identifying early-stage landslide activity and diagnosing roadbed settlement in loess areas, thereby strengthening the basis for subsequent early-warning systems.

[Key words] Time-series InSAR; Artificial Corner Reflector; Loess-related geological hazards; Deformation Monitoring

黄土区域脆弱而敏感,斜坡一旦受扰动便可能迅速失稳,局地地形变往往在肉眼察觉之前已悄然累积。伴随降雨、人类工程活动与地下水变化的叠加,灾害呈现更隐匿、更突发的特征。要在复杂地貌中捕捉微小变形,需要依托更稳定的散射基准点,让监测结果不再受地表粗糙度与季节波动干扰。而人工角反射器

与时序InSAR的结合,不仅在于增强观测精度,还在于为低相干区提供新的可控支撑点,因而具有显著的工程价值,为区域地质安全提供必要保障。

1 研究区概况与角反射器布设

1.1 研究区自然条件与地质特征

研究区位于宁夏与陕北黄土高原过渡带,地貌由塬、梁、峁与切割沟谷构成,坡体高差大、边坡线条破碎,使地表在降雨、冻融与工程扰动下表现出更高敏感性。黄土结构疏松,大孔隙连通度高,湿陷性显著,一旦渗水,内部架构迅速软化,短期内便可能产生突变性形变。高速公路在此类地质体中穿越,路基填挖改变原有应力结构,使边坡稳定性不仅取决于自然属性,还在于工程扰动触发的应力重新分布。如图1所示,高边坡普遍采用多级台阶式防护,该结构在含水量变化时更易受到扰动。伴随季节性降雨过程,坡面含水量抬升,黏聚力下降,让微小位移在薄弱带迅速放大,此外研究区存在HP02滑坡、冯老庄滑坡、JDJA04标173+840-K174+140段左侧高边坡等高风险点,这些位置常表现为加速度先行、位移滞后扩展,要在此环境捕捉毫米级变化,仅依托自然散射点已难形成稳定监测框架。



图1 研究区典型高速公路高边坡工程环境示意图

1.2 地质灾害类型及形成机理

灾害的触发机制一般由自然因素与工程活动共同叠加形成,地表形变多出现在高挖方边坡或沟道侧壁,雨后土体含水量上升,孔隙水压力增强,弱面被激活,剪切带沿着填挖不均或旧滑带展开。沉降则常伴随路基填土压密与湿陷性行为,在持续交通荷载与反复湿润-干燥循环中累积下沉,部分路段在两年周期内沉降幅度可达20-35mm。地裂缝多沿台塬边缘或路基差异沉降带延展,裂缝走向与区域张性应力一致。受两次阶段性强降雨过程影响(如日雨量超过20-35mm),局部坡段位移速率会出现明显跳升,其后又因含水量滞后效应出现持续加速。高边坡以结构松散、排水路径易变为主,其稳定性在短时间内便可能遭到削弱。正因这些灾害类型均具有“早期位移小、响应速度快”的特点,工程区的监测需要在空间与时间上都具备更高的灵敏度。

1.3 角反射器布设原则与实施方案

在黄土区高边坡与路基监测中布设角反射器,关键在于让其在复杂散射背景中保持稳定的回波特征。布设点需按照卫星视线方向选择无遮挡位置,坡面需具备一定施工可达性,并保证角反射器底座牢固嵌入,防止雨季软化造成移位。对于高边坡,

应布设在坡体中段或结构转折点附近,让其直接反映应力集中区的真实位移;对于路基沉降段,可布设在路肩排水沟外缘,使监测点避开车辆荷载干扰^[2]。角反射器的朝向需严格依托 Sentinel-1 降轨几何参数调整方位,并结合当地地形确定最佳倾角。为保证长周期监测的持续性,还需在雨季前进行一次稳固性复核,确认周边土体未发生扰动。布设完成后,角反射器与自然散射体共同组成监测网络,让其在低相干区充当“锚点”,增强时序 InSAR 的整体相干框架,使复杂地貌中原本难以捕捉的微小位移得以清晰呈现。



图2 人工角反射器现场安装

2 时序 InSAR 技术原理与融合方法

2.1 时序 InSAR 形变反演原理

时序 InSAR 的形变反演依托多景 SAR 影像构建相位序列,按照雷达入射路径提取地表微位移。相位信号中混入轨道误差、大气延迟、地形残差和真实形变等成分,关键在于让扰动逐层剥离,使反演结果更接近地表真实行为。黄土区散射环境复杂,干湿循环让自然散射点回波不稳定,导致相干性阶段性崩塌。这让传统空间解算在此类区域难以保持连续,因而反演必须依托短时空基线策略控制几何差异,并在时间维度依托稳健点建网,使其形成可贯穿全时段的相位链。形变模型可依据研究对象表现选择线性、分段或弱非线性方式,但大气延迟的分离始终是核心任务,否则会让序列出现伪周期波动。为让弱形变更早显形,必须引入稳定散射锚点,而人工角反射器恰好填补了黄土区“相干缺口”,让解算过程在复杂背景中仍保持顺畅。

2.2 小基线网络构建与数据处理流程

小基线策略的目的在于缩小干涉影像间的空间与时间差,让黄土区因坡体剧烈变化产生的几何去相干被压到最低, SAR 影像需完成 SLC 配准,使极化方式、入射角、像素方位在同一参考体系内对齐,然后按照基线阈值筛选满足条件的干涉对,在这一过程中轨道精化与多视处理尤为关键,干涉图建立后,依托滤波控制斑点噪声,再依托稳健点完成解缠,若自然散射点在某些区域完全失效,便需让角反射器作为“跳点”维持解缠路径贯通,

随后引入GACOS大气改正数据, 凭借时空滤波移除局部湿度梯度造成的相位偏移, 最终建立时序网络, 依托最小二乘或稳健估计求解形变速率及时间序列^[3]。整个流程特别强调网络的牢固性, 因为黄土区相干点分布极不均匀, 一旦网络断裂便无法追踪真实形变, 而角反射器的稳定性恰好让这条链条被重新焊接。

2.3角反射器在InSAR中的增强机制

人工角反射器在黄土区监测体系中的作用不仅限于“亮点”, 它是整个时序反演的骨架节点, 角反射器能够在不同含水量、不同季节、不同粗糙度背景下保持稳定散射, 其三次反射路径让回波信噪比在同等条件下远高于自然散射体, 从而让其在干扰严重的地段仍能维持高相干。角反射器的加入让时序网络中出现真实、稳定的相位锚点, 使周围像元在解缠中有可依托的基准方向, 也让低相干区的路径得以跨越, 其优势在高边坡尤为突出, 挖方与排水结构切割后散射条件更加混乱, 角反射器的亮度峰值可在雨后相干性骤降阶段仍维持稳定, 让监测系统不至于中断^[4]。更重要的是, 角反射器在时间维度提供了连续参照, 使微弱加速度在早期便能被识别, 不但可增强序列的稳定度, 还可减少模型在拟合时的漂移, 不论是形变前兆、湿陷沉降还是剪切带扩展, 其关键点都因角反射器而变得更清晰。

2.4误差校正与可靠性评估方法

黄土区的InSAR误差来源多样, 大气延迟与局部地形残差是最常见的干扰, 大气延迟在沟谷地带呈强烈空间梯度, 雨后湿度变化可让相位偏移超过数厘米级, 必须借助GACOS外部延迟模型结合时间滤波加以修正。地形误差部分依托AW3D30 DEM完成减除, 但在高边坡切割区域仍可能残留局部偏差, 因而需让角反射器及其附近的高相干点共同参与局部高程偏移的二次估计, 轨道误差一般表现为大尺度长波形态, 可在稳健点基础上完成拟合剔除, 整个序列反演完成后, 必须对结果执行可靠性验证, 其中最关键的是跨源一致性, 包括角反射器—自然散射点的一致性、沉降趋势与工程背景的匹配程度, 以及外业点(如GPS或水准)的差异控制情况, 若角反射器点的日均波动保持在1mm级, 且与地面观测差异稳定在3mm以内, 可视为监测结果在该区具备工程级可信度^[5]。

3 黄土区地质灾害监测与结果分析

3.1研究区典型灾害识别与分布

研究区内地质灾害具有明显的工程控制性, 在长期监测中表现出较强的活动性, 沿线边坡多呈切割式结构, 坡高普遍超过25m, 局部挖方达到40m以上, 层理破碎让其更依赖排水系统维持稳定^[6]。

图3为通过时序InSAR技术监测得到的JDJA04标173+840-K174+140段左侧高边坡形变速率监测图, 图中黄色代表沉降区域, 深蓝色代表抬升区域。结果显示, 研究区内存在多个沉降中心, 主要分布在东南、东北部分和银昆高速太彭段的东西两侧边坡部分, 抬升区则主要分布在南部。沉降速率峰值达-27.53mm/yr, 抬升速率峰值为19.32mm/yr。此外, 银昆高速野太彭段公路位于地面沉降区域的中心, 并穿过了小型抬升区域, 形变的主要原因工程施工, 包括挖填土方、道路改扩建、边坡修筑等。

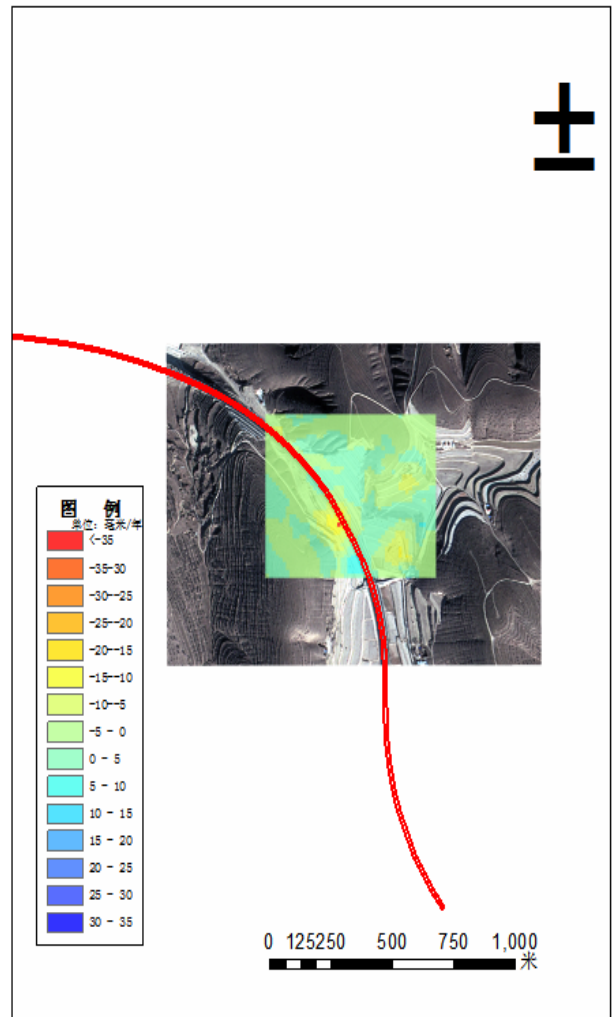


图3 JDJA04标173+840-K174+140段左侧高边坡形变速率监测图

为了分析研究区地表形变过程, 基于InSAR技术获取LOS方向与垂直方向的地表形变时间序列分布图。由图4及图5可知, 2022年1月至2024年3月期间, 研究区发育了一个较大范围的沉降区, 位于银昆高速公路南侧区域。由于银昆高速公路穿越了沉降区, 可能会受到不均匀沉降的影响, 形变的后续发展需持续关注。

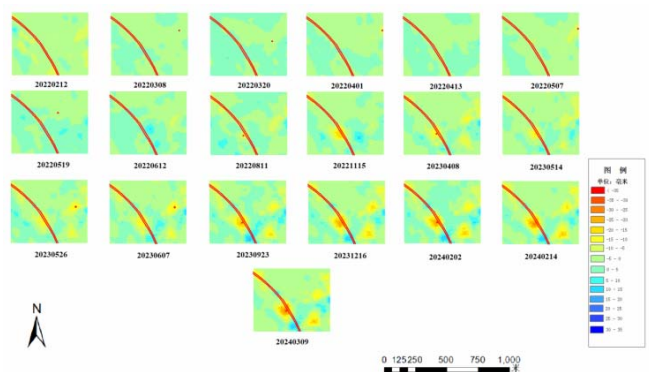


图4 2022-2024年研究区LOS方向地表形变情况

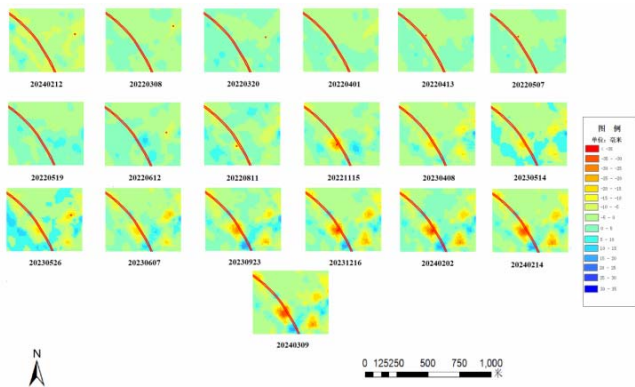


图5 2022-2024年研究区垂直方向地表形变情况

3.2 角反射器监测精度增强评估

角反射器布设后的回波品质在黄土区表现尤为突出,以CR-03点为例,其回波亮度较布设前增强约18dB,全时序相干系数长期保持在0.92以上,而相邻自然散射点的相干系数在0.65左右,角反射器日间位移波动稳定在0.8-1.4mm之间,自然点波动则普遍超过3mm,噪声差异直接影响后续序列稳定性。更关键的是,在低相干区,角反射器提供了解缠“桥点”,让断裂的相位路径重新连贯,使重建后形变带连续度提升约40%,并让形变边界从原本模糊的分散点变为清晰条带,在JDJA04标173+840-K174+140段左侧高边坡沉降的微加速阶段,位移速率由-5.31mm/yr向-17.62mm/yr跃升时,角反射器最先捕捉到加速度变化,领先自然散射点约两周,让潜在失稳过程在尚未扩展前便显露。外业GPS观测也进一步佐证反演效果,两者年位移差异控制在3mm以内,说明角反射器在复杂散射环境中不仅限于提供高亮点,又在于让时序链条更牢固,为工程级监测提供关键支撑。

3.3 典型灾害演化过程与机理解析

沉降的演化过程呈现明显的阶段响应特征,JDJA04标173+840-K174+140段左侧高边坡沉降中心的形变加速主要发生在2023年6月27日至2023年9月23日间,然后随着时间的推移持续发育。除工程施工这一影响因素之外,还与降雨及地质条件有关,6月至9月为此地区的雨季,短时强降雨会使雨水快速渗透至黄土深层,而黄土具有遇水软化、崩解的特性,导致地表加速沉降。而多数加速点在角反射器附近最先显现,说明角反射器在突变过程识别中承担关键作用,对地表形变早期预警具有更高敏感度。

4 结语

角反射器与时序InSAR的结合,让黄土区复杂工程环境中的

形变以更稳定、更细致的方式显现,高相干回波让低质量区域重新具备可追踪的位移序列,不但可增强形变区的识别精度,还可让路基沉降的缓慢演化更清晰。角反射器提供了牢固的相位锚点,使形变带重建更加完整,毫米级位移的提取在高边坡与沉降中心均表现出更高可靠性,未来工作还可在关键坡段和路基薄弱区扩大角反射器布设范围,并将InSAR结果与地下水动态、裂缝监测及交通荷载数据联合,使灾害孕育与演化过程更加透明,为公路沿线的预警体系夯实基础。

【基金项目】

陕西省交通运输厅2023年度交通科研项目(项目编号:23-05K)。

【参考文献】

- [1]张林梵.基于时序InSAR的黄土滑坡隐患早期识别——以白鹿塬西南区为例[J].西北地质,2023,56(03):250-257.
- [2]贫宜舍,张明波,伍宇明,等.基于时序遥感影像的黄土滑坡形变与河流水位关系研究——以天水市清泉村滑坡为例[J].地理科学进展,2023,42(02):353-363.
- [3]姚佳明,姚鑫,刘星洪,等.InSAR技术的水南市活动性滑坡灾害识别与分析[J].测绘科学,2022,47(01):121-132.
- [4]王建业,梁小龙,金喜,等.黄土填方区地表沉降时序InSAR监测分析[J].测绘通报,2021,(08):158-161.
- [5]刘朋俊,张璐,陈元申,等.南水北调中线湿陷性黄土区InSAR时序分析[J].人民长江,2020,51(06):125-128+205.
- [6]朱建军,李志伟,胡俊.InSAR变形监测方法与研究进展[J].测绘学报,2017,46(10):1717-1733.
- [7]弓永峰,王辉,吴学华,等.基于时序InSAR的宁夏西吉县滑坡灾害隐患识别[J].安全与环境工程,2022,29(06):114-121.

作者简介:

晋玉洁(1992--),女,汉族,河北人,硕士,工程师,研究方向:遥感科学与技术。

崔丽(1990--),女,汉族,北京人,硕士研究生,高级工程师,研究方向:遥感交通应用。

董元帅(1985--),男,汉族,黑龙江哈尔滨人,博士,正高级工程师,研究方向:交通工程。

赵力国(1984--),男,汉族,黑龙江海伦人,硕士研究生,正高级工程师,研究方向:公路工程健康监测预警。

李震(1990--),男,汉族,陕西延安人,博士研究生,副高级工程师,研究方向:公路工程健康监测预警。