引文格式：郭子琦,张秋昭,安亚杰,等. 时序InSAR技术水库滑坡隐患区识别的应用研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(8):94-97. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.08.019

时序InSAR技术水库滑坡隐患区识别的应用研究

郭子琦[1]，张秋昭[2*]，安亚杰[1]，贾智乐[1]
（1. 河南省水利勘测有限公司，河南 郑州 450008；2. 中国矿业大学 江苏省资源环境信息工程重点实验室，江苏 徐州 221116）

摘　要：水库库岸边坡稳定是水库运行风险的关键要素之一，特别是蓄水初期库区边坡变形更需重点关注。为实现滑坡低成本普查，利用时序InSAR技术，通过77景降轨Sentinel-1A影像数据分析处理反演洛阳市某水库附近地表变形速率，进行边坡的滑坡隐患识别，结合工程地质原理开展地质调查实地验证工作。结果表明：①时序InSAR技术具有可靠性，可以监测到不稳定地表变形情况，识别滑坡隐患区。②经地质调查实地验证工作，识别的隐患区内均发现地表变形痕迹。③反演隐患坡体变形过程，隐患坡体处在蠕动变形状态。④水库库周路及附属设施施工建设对岸坡稳定影响较大，应采取相应措施。

关键词：InSAR；水库；边坡；滑坡隐患区
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）08-0094-04

Application Research on the Hidden Danger Areas Identification of Landslides in Reservoirs Based on Time Series InSAR Technology

GUO Ziqi[1], ZHANG Qiuzhao[2], AN Yajie[1], JIA Zhile[1]
(1. Henan Water Conservancy Survey Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;2. Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The stability of slopes is one of the key elements of reservoir operation risk, especially in the early stage of water storage, which requires more attention. In order to achieve low-cost landslide survey, we used time series InSAR technology to analyze and process 77 scenes descending orbit Sentinel-1A image data, inverted the surface deformation rate near a reservoir in Luoyang City, and identified landslide hazards on slopes and conduct on-site verification of geological surveys based on engineering geological principles. The results indicate that ①time series InSAR technology is reliable and can monitor unstable surface deformation and identify landslide hazard areas. ②Surface deformation traces are found in the identified hidden danger areas during geological surveys. ③Inverting the deformation process of hidden slope, the hidden slope is in a state of creep deformation. ④The constructions of roads and ancillary facilities have a significant impact on the stability of slope, and corresponding measures should be taken.

Key words: InSAR, reservoir, slope, Landslide hidden danger area

InSAR（interferometric synthetic aperture radar）技术因非接触式、面域追溯历史变形的监控特点，成为了研究滑坡活动规律和预测滑坡风险的重要手段[1]。随着水利工程发展需要，尝试将InSAR技术的研究成果转化至滑坡监测场景，如反演西藏波密县扎木弄沟因堵江截流形成堰塞湖易贡滑坡形成过程[2]；由三峡库区实验性蓄水导致千将坪滑坡失稳现象，探究地质灾害风险普查及防灾减灾治理成效评价体系[3]；由挪威Svartevatn水库变形监测成果验证InSAR坝体监测的可行性[4]；由四川省阿坝州茂县叠溪镇岷江河谷区段的潜在滑坡隐患识别监测成果证明InSAR技术的有效性[5]等。

库岸活动性滑坡对人居安全、工程设施、生态环境具有现势直接威胁，微小变形是其最主要的特征。本文以洛阳市某水库为例，通过对InSAR监测数据的获取、处理和解释，划定滑坡隐患区，开展地质调查实地验证，提供水库边坡滑坡预警和监测方法，为水库地质灾害的防治提供技术支撑。

1　研究区和数据介绍

1.1　研究区概况

研究区位于淮河流域沙颍河支流北汝河上游，研究

项目来源：国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点资助项目（U22A20569）；河南省2022年度水利科技攻关项目（GG202215）。
第一作者简介：郭子琦（1996—），硕士，助理工程师，主要从事基于InSAR技术的工程地质与地质灾害等方面的工作，E-mail：gzq1996777@163.com。
通信作者：张秋昭（1985—），博士，教授，博士研究生导师，主要研究方向为惯性测量、结构健康监测等方面的科研与教学，E-mail：qiuzhaocumt@163.com。

对象地处洛阳市上店镇，是以防洪任务为核心的大（2）型水库，兼具灌溉、供水与发电功能。于2015年批复开工，2020年3月举行下闸蓄水仪式，根据影像识别2020年8月水库水位达常态水位。研究区域概况如图1所示。

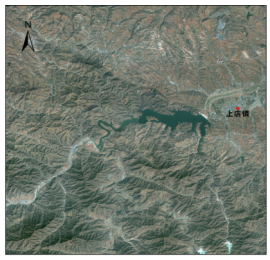


图1　研究区域示意图

1.2　数据介绍

研究收集水库达常态水位后，覆盖研究区域2020年8月30日—2023年4月29日连续77景干涉宽幅模式（Interferometric Wideswath，IW）降轨Sentinel-1A雷达卫星影像数据，Sentinel-1A卫星重访周期为12 d，IW模式原始分辨率5 m×20 m；研究采用SRTM DEM、影像同期GACOS（通用大气校正在线服务）气象数据和卫星轨道数据，优化影像配准、地理编码、大气滤波等技术处理的精度。

2　研究方法及原理

2.1　研究方法

PS-InSAR仅保留像元内部后向散射极强信号，采用振幅离差阈值法实现监测点位选取，通常可获取较高位置精度。SBAS采用相干系数法加权计算像元内所有散射体信号，面对失相干问题时表现出较强的对抗性。

水库库区植被茂盛，建筑物稀疏，后向散射信息弱，且缺少同时期地面先验数据。研究形成了时序In-SAR融合技术流程，利用PS-InSAR提取的稳定变形点作为SBAS技术的起算控制点，实现地面控制点缺失情况下的、广域范围的地表变形监测。

2.2　PS-InSAR原理

获取研究区域 N 景SAR影像，选定公共主影像与其余 $N-1$ 幅影像依次差分干涉处理。通过比较振幅离差阈值 选取PS候选点[6]。

$$D_a=\frac{\sigma_a}{\mu_a} \tag{1}$$

式中，D 和 μ 分别为像元 的时序振幅方差和均值。通常，优先提取 较小像元以保证PS 候选点稳定性。PS候选点像元相位由地形、形变、噪声误差、大气误差和整周模糊度组成[7]，通常在差分干涉处理中导入DEM去除地形相位，利用时空相关性滤波处理去除从而获取变形相位。

2.3　SBAS-InSAR原理

SBAS-InSAR技术设置时空基线阈值来选取小基线干涉对[8-9]。获取 N 幅SAR影像，时刻差分干涉图相位为：

$$\delta_{\varphi_i}=\varphi_2-\varphi_1\approx\frac{4\pi}{\lambda}(d_2-d_1) \tag{2}$$

式中，λ 为雷达波长；φ_1，φ_2，d_1，d_2 分别为 t_1 和 t_2 时刻信号相位和变形量。相位还可用速率、时间乘积表示，并与公式联立：

改写为矩阵形式：

$$\boldsymbol{B}v=\delta\varphi_j \tag{3}$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}-1 & 0 & 1 & \cdots & 0\\ 0 & -1 & 1 & \cdots & 0\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ 0 & 0 & -1 & \cdots & 1\end{bmatrix}$$

式中，$\boldsymbol{B}$ 为奇异值分解矩阵。是待求解的平均变形速率。通常利用SVD算法和最小二乘法获取研究区域累计形变量[10]。

3　滑坡隐患区识别

利用77景哨兵数据，基于InSAR技术对洛阳某水库及周边进行变形监测，如图2所示，通过颜色反映地表年平均变形速率大小，提取827 091个观测点，多为稳定的后向散射点或高相干目标点（人工建筑物、构筑物、裸岩等地物目标），山区植被覆盖、因阴影遮挡等问题，导致观测精度、观测点覆盖程度相对较低。重点分析水库库岸监测点变形数据，提取3个边坡滑坡隐患区A、B、C。图3为InSAR年平均变形速率成果图及滑坡隐患区位置示意图，该区域最大变形速率达78.07 mm·a^{-1}。

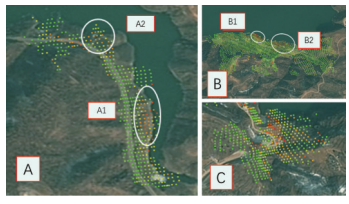


图2　滑坡隐患区InSAR示意图

注：明显沉降监测点使用红色点标记。

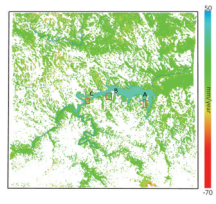


图3　InSAR年平均变形速率图及滑坡隐患区位置示意图

4　滑坡隐患区实验

4.1　隐患区A实地验证

2016年开始至今，水库库周路复建工程陆续开展，工程弃渣沿边坡堆积，稳定性差。结合现场实地

情况，两处明显变形位置相距超1 km且不存在空间关联性，将隐患区A细化为隐患区为A1和A2。如图4所示，滑坡隐患区A1边坡长约150 m，发现3处滑坡隐患体，滑坡体边界如白线所示；如图5所示，滑坡隐患区A2，边坡长约90 m，因边坡陡峭，无法进一步调查边坡中下段滑坡体征。

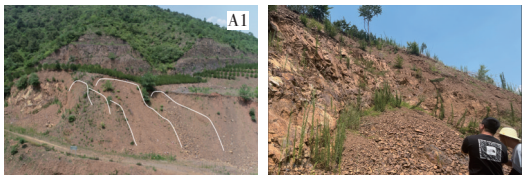


图4 滑坡隐患区A1无人机拍摄照片（左）与现场调查情况照片（右）



图5 滑坡隐患区A2无人机拍摄照片（左）与现场调查情况照片（右）

隐患区A1、A2明显地表变形痕迹证明InSAR监测结果具有可靠性。取隐患区中心点位作为滑坡特征点，分析变形过程时序曲线（图6、7），特征点变形速率随时间增加而减少且逐渐趋于稳定，结果表明坡体仍处在蠕变状态，库周路复建工程弃渣沿边坡堆放存在一定程度的安全隐患。

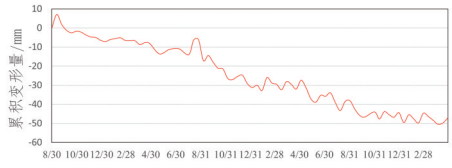


图6 滑坡隐患区A1特征点变形过程曲线图

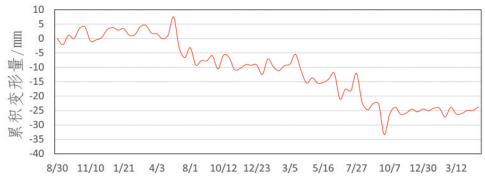


图7 滑坡隐患区A2特征点变形过程曲线图

4.2 隐患区B实地验证

结合现场实地情况，将滑坡隐患区B细化为隐患区B1和B2。滑坡隐患区B1，边坡长约170 m，如图8所示，库周路复建工程弃渣沿边坡堆积，表层松散体滑落，且隐患体表面有明显裂缝；如图9所示，滑坡隐患区B2，边坡长约180 m，为岩石岸坡，表层植被覆盖，疑似存在滑坡痕迹，滑坡体痕迹如白线所示，底部宽度约80 m。

取隐患区中心点位作为滑坡特征点，分析变形过程时序曲线，隐患区B2的错台疑似产生在2021年6月—9月期间，隐患区B1地表裂缝明显证明InSAR监测结果具有可靠性，隐患区B1、B2坡体仍处在蠕变状态，库周路复建工程弃渣沿边坡堆放存在一定程度安全隐患，B2隐患坡体有必要重点监控。



图8 滑坡隐患区B1无人机拍摄照片（左）与现场调查情况照片（右）



图9 滑坡隐患区B2无人机拍摄照片（左）与现场调查情况照片（右）

4.3 隐患区C实地验证

隐患区C正在进行库周路公园建设。现场调查发现边坡土质明显分层，分层界线如图10白线所示，白线下层为白色土质层，上层为松散层碎石，土质层上部有细小裂缝，疑似受上方碎石层压力导致固结。



图10 滑坡隐患区C无人机拍摄照片（左）与现场调查情况照片（右）

隐患区C明显地表变形痕迹证明InSAR监测结果具有可靠性。取隐患区中心点位作为滑坡特征点，分析变形过程时序曲线，库周路公园建设对地形起伏影响疑似主要发生在2021年11月和2022年7月，InSAR监测结果表明该区域变形速率整体放缓，但坡体仍处在蠕变状态，后续建设施工过程中，应同步监测下层白色土质层细小裂缝变化趋势，确保坡体稳定。

5 结 语

文中应用InSAR技术对水库库岸滑坡隐患进行监测与分析，得到以下结论：

1）时序InSAR技术获取827 091个监测点变形数据，划分出滑坡隐患区A、B、C。经现场调查，隐患区均有明显变形痕迹，验证了InSAR监测结果的可靠性。

2）滑坡隐患区A与B1因库周路复建工程弃渣堆积不稳定导致变形，B1边坡有明显裂缝，B2为岩石岸坡有疑似滑坡痕迹；隐患区C因上方施工碎石压力导致土质层细小裂缝。建议在地质灾害高发期重点监控隐患区变形。

3）库周路下边坡整体稳定，但工程弃渣堆积不稳定，可能沿坡滑落，影响库岸地形。建议及时整治弃渣堆积，并在库周路两侧挖槽，减少交通对边坡的影响，保护边坡稳定。

参考文献

[1] 廖明生,唐婧,王腾,等. 高分辨率SAR数据在三峡库区滑坡监测中的应用[J]. 中国科学(地球科学),2012,42(2):217-229

[2] 王哲,赵超英,刘晓杰,等. 西藏易贡滑坡演化光学遥感分析与InSAR形变监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(10):1 569-1 578

[3] 朱同同,史绪国,周超,等. 利用2016—2020年Sentinel-1数据监测与分析三峡库区树坪滑坡稳定性[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(10):1 560-1 568

[4] Voege M,Frauenfelder R,Larsen Y. Displacement Monitoring at Svartevatn Dam with Interferometric SAR [C]//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,Munich: IEEE,2012:3 895-3 898

[5] 李梦华,张路,董杰,等. 四川茂县岷江河谷区段滑坡隐患雷达遥感识别与形变监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(10):1 529-1 537

[6] 张秋昭,郭子琦,刘华,等. 一种基于PSI技术的桥梁纵向位移形变监测的方法[P]. 江苏省:CN110174044B,2021-08-03

[7] Ferretti A,Prati C,Rocca F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2000,38(5):2 202-2 212

[8] Ferretti A,Prati C,Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2001,39(1):8-20

[9] 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):2 375-2 383

[10] 郭子琦. 利用时间序列InSAR技术监测桥梁变形及其周边地表沉降[D]. 北京:中国矿业大学,2021

(上接第85页)

量化和田地区生态敏感性。结果显示，较低敏感度区占比56.53%，中敏感度区24.95%，低敏感度区7.21%，较高敏感度区6.95%，高敏感度区4.36%。空间分布呈现中部高、南北低的特征，高敏感度区集中在昆仑山脉北缘，低敏感度区多在塔克拉玛干沙漠。植被指数（NDVI）和土地覆盖是主要影响因素。生态敏感度分布存在显著的空间异质性和集聚特征，低–低集聚在北部沙漠，高–高集聚在昆仑山脉北缘，高–低集聚沿河流两侧分布。未来研究应引入更多社会经济因素，探索新方法提高权重确定的客观性，为政策制定提供更科学的依据。

参考文献

[1] 欧阳志云,王效科,苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J]. 生态学报,2000,19(1):10-13

[2] 张广创,王杰,刘东伟,吉力力·阿不都外力.基于GIS的锡尔河中游生态敏感性分析与评价[J]. 干旱区研究,2020,37(2):506-513

[3] 李振亚,魏伟,周亮,等. 中国陆地生态敏感性时空演变特征[J]. 地理学报,2022,77(1):150-163

[4] 刘若琦,黄志强. 基于AHP-GIS的宜春市生态敏感性评价[J]. 地理空间信息,2024,22(4):54-59

[5] 开买尔古丽·阿不来提,毛东雷. 和田地区近60 a沙尘天气的时空变化特征[J]. 甘肃农业大学学报,2022,57(2):145-152

[6] 黄珺嫦,刘伟. 生态敏感性分区中敏感性因子指标体系的确定[J]. 现代农业科技,2006,34(10):155-156

[7] 潘峰,田长彦,邵峰,等. 新疆克拉玛依市生态敏感性研究[J]. 地理学报,2011,66(11):1 497-1 507

[8] 赵欣,付蓉洁,辛存林,等. 基于AHP的民勤县生态敏感性评价[J]. 西北师范大学学报(自然科学版),2022,58(6):38-46

[9] 陈榕榕,丁铮. 基于GIS的泉州市生态敏感性分析[J]. 环境与发展,2022,34(4):100-109

[10] 甘梓莹. 基于GIS的广东省生态敏感性分析[J]. 中国资源综合利用,2022,40(9):43-46

[11] 张睿婕,高元. 多源数据融合下的关中传统村落景观生态敏感度评价[J]. 现代城市研究,2022,36(12):9-17

[12] 何航,张勃,侯启,等. 1982—2015年中国北方归一化植被指数(NDVI)变化特征及对气候变化的响应[J]. 生态与农村环境学报,2020,36(1):70-80

[13] 王秀兰,包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展,1999,17(1):83-89