引文格式：侯春尧,陈一鸣,张洪毅,等. 融合角反射器InSAR监测水电工程控制网及边坡稳定[J]. 地理空间信息, 2025, 23(2): 103-107. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2025.02.023

融合角反射器InSAR监测水电工程控制网及边坡稳定

侯春尧[1]，陈一鸣[2,3*]，张洪毅[1]，雷　洋[2,3]，刘　杰[4]，李　陶[4]
（1. 中国长江电力股份有限公司，湖北 宜昌 443002；2. 长江空间信息技术工程有限公司（武汉），湖北 武汉 430010；
3. 国家大坝安全工程技术研究中心，湖北 武汉 430010；4. 武汉大学卫星导航定位技术研究中心，湖北 武汉 430079）

摘　要：传统测绘手段受制于坝区地形和气象条件复杂，使得水电工程控制网稳定性评估复测的周期长、成本高，且对库岸边坡变形监测的时效性不足。通过在近坝区的水电工程控制网点附近布设人工角反射器，并利用高分辨率SAR卫星时序分析技术进行观测，结果显示利用角反射器可实现精度为2~3 mm每月一期的控制网点状态评估。利用SBAS-InSAR时序分析技术对坝区内多个滑坡体的变形信号进行了提取，并开展了形变演化过程分析，结果表明提出的结合角反射器和InSAR技术的水电工程控制网基准点稳定性监测方法，为大坝安全监测基准评估提供了新技术手段，可大幅提升电厂安全运营的技术水平并降低人工观测频次。随着国产SAR卫星的进一步成熟，该技术有望能够实现自主可控的水电工程基准网稳定性评估和无人化的坝区滑坡变形安全监测。

关键词：InSAR；人工角反射器；水电工程；控制网；时间序列；边坡
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）02-0103-05

Stability Monitoring of Control Network and Slope near Hydropower Station Integrating with Corner Reflector and InSAR

HOU Chunyao[1], CHEN Yiming[2,3], ZHANG Hongyi[1], LEI Yang[2,3], LIU Jie[4], LI Tao[4]
(1. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China;
2. Changjiang Spatial Information Technology Engineering Co., Ltd., Wuhan 430010, China;
3. National Dam Safety Research Center, Wuhan 430010, China;
4. Global Navigation Satellite System (GNSS) Research Centre, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Traditional surveying and mapping techniques are constrained by the complexity of topography and meteorological conditions near the hydropower station area, which makes the stability assessment retesting of hydropower project control network long and costly, and the timeliness of deformation monitoring of reservoir bank slopes is insufficient. By deploying artificial corner reflectors near the control nodes of hydropower projects in the near-dam area and using high resolution SAR satellite time-series analysis techniques for observation, the results showed that the use of corner reflector can achieve an accuracy of 2~3 mm and a twice-monthly assessment of the state of control nodes. We used SBAS-InSAR time-series analysis technology to extract the deformation signals of several landslides in the dam area, and analyzed the deformation evolution process. The stability monitoring method of hydropower engineering control network reference point combined with corner reflector and InSAR technology proposed in this paper provides a new technical means for dam safety monitoring benchmark assessment, significantly improves the technical level of power plant safety operation and reduces the frequency of manual observation. With the further maturation of domestic SAR satellites, the technology is expected to be able to realize autonomous and controllable stability assessment of hydropower engineering benchmark networks and unmanned safety monitoring of landslide deformation in dam areas.

Key words: InSAR, artificial corner reflector, hydropower station, control network, time-series, slope near hydropower station

近年来，国内外学者利用SBAS-InSAR技术对三峡大坝及库区木鱼包滑坡[1-2]、白鹤滩库区滑坡[3]、小浪底大坝[4]、锦屏水电站左岸边坡[5]、乌东德水电站库区滑坡[6]、伊拉克摩苏尔大坝等[7]水利枢纽工程展开了坝区变形监测及库岸滑坡识别工作，变形监测精度皆达到了毫米级，其中白鹤滩库区早期滑坡识

项目来源：国家自然科学基金资助项目（U2340228）；国家自然科学基金面上项目（42074031）；三峡金沙江川云水电开发有限公司永善溪洛渡电厂科研项目（4122020011）。
第一作者简介：侯春尧（1985—），硕士研究生，高级工程师，从事一线水电工程水工建筑物安全管理、维护、监测、检测等工作，E-mail：hou_chunyao@ctg.com.cn 。
通信作者：陈一鸣（1992—），博士研究生，高级工程师，从事InSAR变形监测、北斗/GNSS变形监测、大坝安全监测等工作，E-mail：chenyiming5@cjwsjy.com.cn 。

别率达到92.3%，验证了InSAR技术用于大坝工程监测的有效性。

本文利用SBAS-InSAR技术对西南某水电站坝区边坡进行滑坡隐患探测，并结合CR-InSAR[8-9]技术在坝周重要点目标高精度变形监测的优势，通过在坝区监测控制网点附近布设人工角反射器来增加控制网点变形监测的频次，为坝区控制网稳定性地评估提供了新的技术和数据支撑[10-12]。

1 InSAR数据处理方法

1.1 角反射器与SBAS-InSAR融合的变形监测

基于SBAS-InSAR技术和角反射器阵列来对西南某水电站区域的滑坡和控制网点进行稳定性评估。利用SBAS-InSAR技术可以监测西南某水电站坝区大范围面域变形，为滑坡隐患探测提供数据支撑。对于西南某水电站控制网点，本文通过现场查勘选点，点位强度对比分析，在西南某水电站区域安装了6个适用于升降轨道的二面角反射器，并测定有高精度的GPS坐标，用于后期角反射器在SAR影像中的位置查询和高精度变形解算。

1.2 角反射器数据处理方法

安装了支持升降轨模式的人工角反射器，采用GPS精确测量角反射器的坐标及高程，基于角反射器坐标，通过距离-多普勒方程可以求解到其在SAR影像中的位置，并基于GPS获取的高程信息进行精确的高程相位改正，通过求解角反射器之间的差分相位结果，可获取角反射器的形变量，其流程如图1所示。

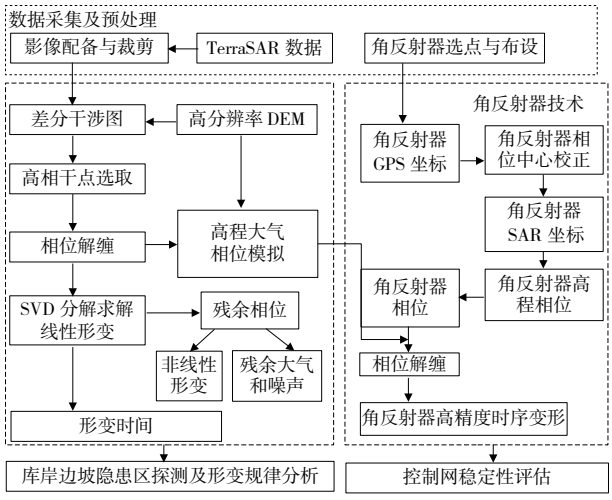


图1 结合SBAS技术和角反射器的变形监测数据处理流程

差分干涉图中角反射器相位构成可用如下公式表示：

$$\Delta\varphi=\Delta\varphi_d+\Delta\varphi_h+\Delta\varphi_a+\Delta\varphi_n+2\pi k \tag{1}$$

式中，φ_d 为形变引起的相位；φ_n 为雷达系统噪声导致的相位；φ_a 为2次观测时大气状态不同引起的大气效应相位；k 为整周模糊度；φ_h 为高程残差相位，与垂直基线有关：

$$\varphi_h=\frac{4\pi}{\lambda}\frac{B_\perp\Delta h}{R\sin\theta} \tag{2}$$

式中，$B_\perp$ 为垂直基线；Δh 为高程残差相位；θ 为入射角；R 为斜距。对于角反射器来讲，由于获取了厘米级精度的高程信息，可对高程进行精确改正，地形残余相位可以忽略不记。

大气效应是InSAR观测的主要误差源，大气效应相位 φ_a 通常可分为与地形相关的垂直分层大气和局部的湍流大气相位，由于本文研究区域的地形高程差达到几百米，垂直分层大气影响较为明显，在计算中不容忽视。本文基于干涉图中选取的高相干点位，采用线性模型进行高程大气的校正：

$$\varphi_a=qh+\mathrm{C} \tag{3}$$

式中，h 为高程；q 为待求解的高程系数；C为整体偏移量常数。

在进行大气校正后，选定参考点，对角反射器构建三角网，各弧段间相位差为：

$$\Delta\varphi_{i,j}=\frac{4\pi}{\lambda}\Delta d+\Delta\varphi_{a,\mathrm{res}}+\Delta\varphi_n+2k\pi \tag{4}$$

式中，i 和 j 为弧段的2个点位；$\Delta\varphi_{a,\mathrm{res}}$ 为残余的大气相位，在弧段距离较近时可以忽略，对角反射器进行时空相位解缠，综合各个干涉对结果即可获取角反射器时序形变。

1.3 SBAS-InSAR数据处理方法

采用多主影像策略进行干涉对组合，设置时空基线的阈值来组合干涉对，尽可能多的累积高相干干涉图的数目，最小化时间/空间去相干的影响，该技术一方面更有效的利用了数据采样，另一方面使得PS点的空间密度提升，可获得更为全面的形变量测结果。

SBAS技术利用 N 个SAR影像数据集形成 M 个小集合，对于从影像 t_A 和主影像 t_B 时刻获取的SAR影像生成的第 j 幅差分干涉图，SAR坐标系下 (x,y) 像素的干涉相位可以写成：

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_j(x,r)&=\varphi_{t_B}(x,y)-\varphi_{t_A}(x,y)\approx\\&\frac{4\pi}{\lambda}\left[d_{t_B}(x,y)-d_{t_A}(x,y)\right]+\Delta\varphi_h^j(x,y)+\\&\Delta\varphi_a^j(x,y)+\Delta\varphi_n^j(x,y)\end{aligned} \tag{5}$$

式中，$d_{t_B}(x,y)$ 和 $d_{t_A}(x,y)$ 分别为 t_B 和 t_A 2个时刻的累计形变；$\Delta\varphi_h^j(x,y)$ 、$\Delta\varphi_a^j(x,y)$ 和 $\Delta\varphi_n^j(x,y)$ 分别为第 j 个干涉图中的DEM残余相位、大气延迟误差和噪

声。在不考虑残余地形相位、大气延迟相位和噪声相位时，且认为短时间基线的形变速率是近似线性的，则整个时间跨度内形变速率可以表示为：

$$V^T=[v_1,\ldots,v_N]=\left[\frac{\varphi_1-\varphi_0}{t_1-t_0},\ldots,\frac{\varphi_N-\varphi_{N-1}}{t_N-t_{N-1}}\right] \tag{6}$$

第 j 个解缠干涉图的相位可以被写为：

$$\sum_{t_{1,i+1}}^{t_{2,j}}(t_i-t_{i-1})v_i=\Delta\varphi_j \tag{7}$$

其矩阵表达形式为：

$$\boldsymbol{B}v=\Delta\varphi \tag{8}$$

式中，$\boldsymbol{B}$ 的维数为 $M\times N$，当 $\boldsymbol{B}$ 是秩亏矩阵时需采用SVD（奇异值分解）方法进行求解。

2　研究区与研究数据

2.1　研究区和TerraSAR-X数据

西南某水电站枢纽由拦河大坝、泄洪建筑物、引水发电建筑物等组成，自2013年5月蓄水后，监测数据显示枢纽区较大尺度范围发生了库盆沉降和谷幅收缩现象，其影响范围较广，严重威胁区域内的人员生命财产和基础设施安全。本文以西南某水电站近坝区作为研究区域，SAR数据采用覆盖西南某水电站的2021年3月—2022年9月的17景降轨TerraSAR-X条带模式数据。

2.2　人工角反射器布设

通过勘察控制网网点周边的地形条件和现场环境，并基于安装地点SAR影像强度信息，设计了角反射器布设方案，并于2021年5月12日，在西南某水电站区域安装了6个适用于升降轨道的二面角反射器，其中4个布设在TM2-1、TM5、TN15和TN16网点，2个布设在MJH及MZS点位附近。

本研究中采用了新式二面角反射器，其角度和结构适配雷达卫星升降轨模式，可根据不同卫星的入射角进行定制。三维结构示意图如图2所示，两块面板呈90°拼接为一幅面板，以形成二面角反射。面板具体尺寸为直径600 mm。左右两幅面板分别针对升轨和降轨，两幅面板的夹角根据升降轨卫星方位角的差异来进行设计。人工角反射器的中心转轴部位具有GNSS天线连接杆，可实现高精度的坐标观测，甚至角反射器与GNSS的同步观测能力。

3　近坝区工程控制网与滑坡变形InSAR监测结果

3.1　人工角反射器强度分析

6个角反射器在SAR影像中的分布情况见图3a所示，

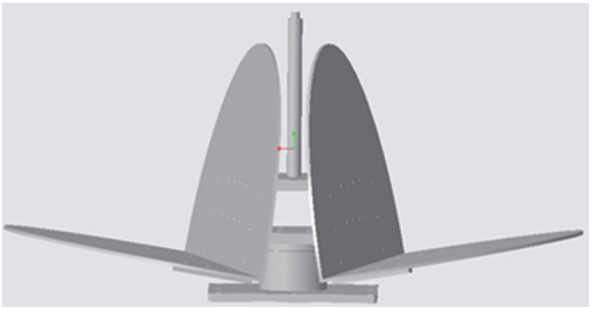


图2　新式二面角反射器示意图

其中黄色标记为差分干涉基准的角反射器，红色点位为变形监测点位，背景为TerraSAR-X强度影像。角反射器中心位置的计算方法是通过角反射器的WGS84地理坐标，结合距离多普勒方程反算其在SAR影像中的位置。以7×7的窗口提取了角反射器及其周边像元的强度值，由图3b所示，可以看出，角反射器在图像中大概占据有5~6个像元，各个角反射器之间的强度大小有些许差异，但基本在68 dB左右，结合背景的杂波强度，角反射器的信杂比基本在20 dB左右，理论上可获取毫米级的形变监测精度。根据TerraSAR数据时序处理的先验变形信息发现，TN15所在区域无变形发生并且其位置位于几个角反射器中央。因此，本文选择TN15作为稳定的参考点，并构建三角网进行角反射器的形变解算。

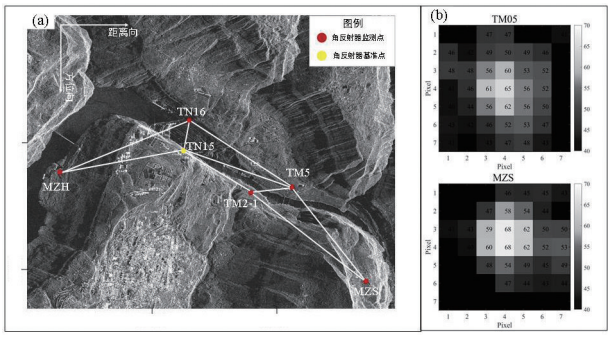


图3　角反射器在SAR影像中的位置及其强度影像

3.2　融合角反射器的水电工程控制网稳定性InSAR监测结果

本文选择角反射器中心点的相位进行计算，选取TN15为参考点计算每幅干涉图中其他角反射器的差分相位。图4展示了角反射器差分干涉图（子图a~d）、模拟的高程大气（子图e~h）以及大气校正后的角反射器相位（子图i~l）。可以看出，在绝大多数幅干涉图获取的角反射器相位中，除MZS以外，其他5个点的相位均较为一致，其主要的原因是因为MZS点的高程较其他点位差别较大，达到了1 033 m，而其他5个点位的高程集中在400~700 m之间，而稳态大气与高程具有显著的相关性。要想获取角反射器的准确变

形，必须对高程大气进行拟合并去除。

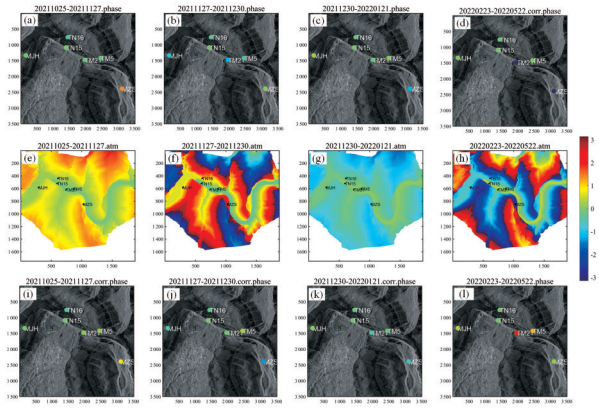


图4 角反射器差分干涉相位与大气校正

注：图4a，b，c，d为干涉图的角反射器相位，e，f，g，h为模拟的高程大气校正相位，i，j，k和l为大气校正后的角反射器相位

在进行高程大气相位的拟合时，需要利用大部分区域的相位信息，进行多视处理可有效提高大部分区域的相干性并提高运算效率。本文对干涉图采用了4∶4的多视，并对相干性大于0.5的点位进行了相位解缠。基于解缠的相位结果，利用线性模型进行了与高程相关的大气相位拟合。各个图中的高程大气相位影响存在有差异，如2021-11-27—2021-12-30幅影像的高程大气较为严重，而2021-10-25—2021-11-27幅影像的高程大气影响较小，但无论影响大小与否，大气的准确估计和去除对角反射器毫米级的变形监测来讲都是不可或缺的。

以2021-10-25为主影像计算其他几个角反射器的累计时序变形，见图5。可以看出，MZS角反射器的时序结果中存在持续变形，形变量最终达到2 cm左右，其余靠近坝区的几个角反射器的累计量均在毫米量级，其标准差在3 mm左右。由于其时间序列趋于稳定，可认为几个工程控制网点角反射器之间相互稳定，无相对位移发生。

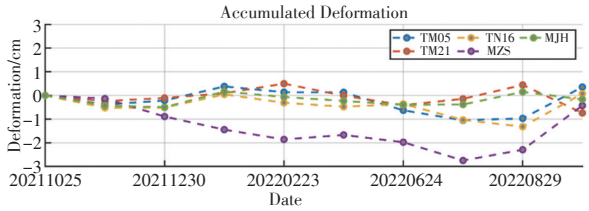


图5 角反射器的累计变形量

3.3 近坝区滑坡变形演化特征SBAS监测结果

采用SBAS技术和TerraSAR-X数据获取2021—2022年的某坝区累计变形量图和部分点位的时间序列结果（见图6）。结果显示大部分区域趋于稳定，对发现的4个变形区分别标记为A，B，C和D，这4个区域分别对应的大概位置为水田村，大坝下游沿江滑坡，某坝区左岸杨家坪和二坪子沟堆渣场，各个区域的形变影响范围最大达到百米。InSAR时序形变结果展示出了各个形变点位的运动趋势，A和B两处变形区的变形随着时间的增加而逐渐增长，而C和D两处区域在2021年10月以前都趋于稳定，在2021年12月左右出现变形，然后变形量降低。

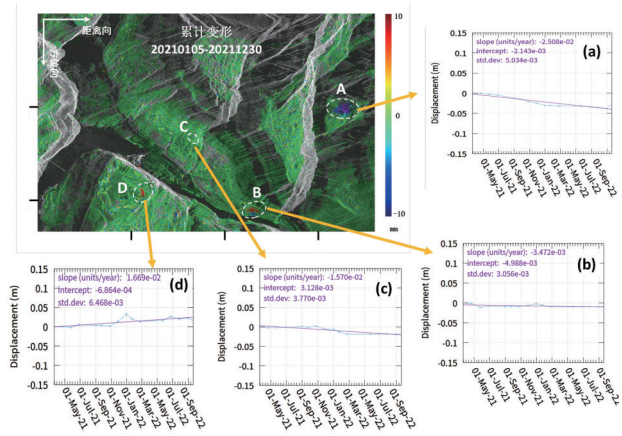


图6 TerraSAR获取的某坝区累计变形量及各点位时序变形结果

结合变形量级和区域特征开展进一步分析，图8展示了其对应的地理编码后的变形图及光学影像。可以看出，水田村滑坡（A点）的变形呈现出随着时间而逐渐增大，变形量在1 a的时间内达到5 cm。坝体下游沿江变形区（B点）的变形趋势与A点类似，只是变化的趋势较A点较小，累计变形量的大小为1 cm左右。

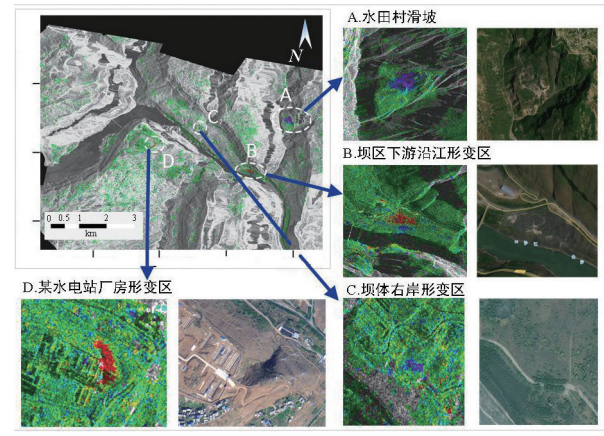


图7 地理编码后的累计变形图及变形区对应的光学影像

C，D点的变形趋势则和A，B点不相同，结合图7的光学影像来看，C点位于左岸杨家坪附近高边坡，其在2021年11月以前都保持着较为稳定的状态，从2021年11月起则开始逐渐发生变形，变形到2022年3月份才重新趋于稳定，最终在2022年9月时达到变形量2.5 cm，与图8的该区域现场调查结果相一致。D点位于距离电厂较近的二坪子沟堆渣场，其在2021年11月前，都处于稳定状态，然后变形表现

为先抬升后沉降，到了2022年3月开始发生变形稳定，最终变形量在9月时达到1 cm。图9展示了利用全站仪/水准仪开展的人工观测二坪子沟堆渣场位移监测结果，结果显示的6个测点垂直位移也呈现出先升后降的趋势。在2021年9月—2022年4月监测到的最大变形的HV05–ZC3（5#马道东南侧）垂直位移达到了10 mm，InSAR观测结果与人工观测位移结果对比显示两者具有较好的一致性，表明其可助于划定形变区域范围外，还可准确捕获到形变边坡的运动态势。



图8　杨家坪滑坡现场调查照片

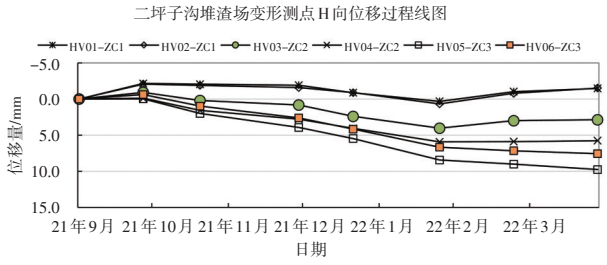


图9　二坪子沟堆渣场变形测点垂向位移时序形变图

4　结　论

本文提出了一套结合人工角反射器的水电工程控制网点稳定性监测和评估方法，利用高分辨率TerraSAR卫星数据，开展了坝区工程控制网点稳定性评估。基于人工角反射器的变形监测结果显示，控制网附近的角反射器点InSAR变形监测结果的精度达到3 mm。对应区域的控制点变形量极小，位置处于稳定状态。

利用SBAS–InSAR时序分析技术对近坝区滑坡体进行了变形监测应用验证，结果显示，该方法能够有效探测出近坝区潜在滑坡隐患变形区。针对坝区附近的重要滑坡监测区域，干海子滑坡群、杨家坪滑坡和二坪子沟堆渣场滑坡的InSAR时序变形监测结果显示，这些滑坡体的运动态势与实地勘察结果具有很好的一致性，变形量最大区域为水田村滑坡，累计变形速率约为5 cm/a。

本文的研究成果显示SAR卫星遥感技术在坝区边坡变形、基准点稳定性评估等工作上具有监测频次高，精度可达2~3 mm；在坝区边坡变形方面具有作业范围广，隐患探测及时等优势，随着国产SAR卫星的发射，未来可做到更高频次的卫星重访，将实现对大坝库区地质环境的近实时动态监测，为提升坝区安全运营水平提供有力的信息支撑。

参考文献

[1] 李铮,张国栋. 基于Sentinel-1数据的三峡库区木鱼包滑坡时空变形演化特性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2024,46(3):50-56

[2] 王腾,Daniele P,Fabio R,等. 基于时间序列SAR影像分析方法的三峡大坝稳定性监测[J]. 中国科学(地球科学),2011,41(1):110-123

[3] Dun J, Feng W, Yi X, et al. Detection and Mapping of Active Landslides Before Impoundment in the Baihetan Reservoir Area (China) Based on the Time-series InSAR Method[J]. Remote Sensing,2021,13(16):3 213-3 234

[4] 何子鑫,于海洋,谢赛飞,等. 小基线集InSAR技术的小浪底大坝形变监测[J]. 测绘科学,2022,47(5):66-72

[5] 王振林,廖明生,张路,等. 基于时序Sentinel-1数据的锦屏水电站左岸边坡形变探测与特征分析[J]. 国土资源遥感,2019,31(2):204-209

[6] Zhao C Y, Kang Y, Zhang Q, et al. Landslide Identification and Monitoring Along the Jinsha River Catchment (Wudongde Reservoir Area), China, Using the InSAR Method[J]. Remote Sensing,2018,10(7):993-1 012

[7] Milillo P, Porcu M C, Lundgren P, et al. The Ongoing Destabilization of the Mosul Dam as Observed by Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. IEEE,2017,23(28):6 279-6 282

[8] 赵俊娟,李成范,尹京苑,等. 干涉雷达人工角反射器技术[J]. 西北地震学报,2011,33(4):403-407

[9] 刘冬,刘星年,陈超,等. 基于CR-InSAR的煤矿区地表沉陷监测研究[J]. 现代测绘,2015,38(4):26-29

[10] 颜芳,孙芳,徐锐,等. CRInSAR和PSInSAR技术在地表形变监测中的应用[J]. 无线互联科技,2020,17(8):139-142

[11] 王彦平,白泽朝,林赟,等. InSAR双向矩形角反射器阵列形变监测精度评估与验证[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(10):1 471-1 477

[12] Xia Z, Motagh M, Li T. Performance Analysis of Dihedral Corner Reflectors for Slope Movements: A Case Study from Aniangzhai Landslide in China[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2022,19:1-5