

滑坡形变的升降轨时序干涉合成孔径雷达监测与分析

钟彬¹, 柳志云^{2**}, 李向新^{1,3*}, 吕加颖¹¹昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650031;²中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650000;³高原山区测绘技术应用工程研究中心, 云南 昆明 650093

摘要 采用升降轨时序干涉合成孔径雷达(InSAR)技术对金沙江某水电站库区边坡的滑坡形变进行识别和监测。研究结果与研究区历史滑坡地质调查划定的滑坡体范围和全球定位系统(GPS)监测成果相符,说明 InSAR 技术在山区水库边坡形变的监测中具有可靠性和实用性。其中新建滑坡体形变速率较大,最大年平均视线向形变速率可达 198.90 mm/a。结合同时期 GPS 数据验证 InSAR 监测新建滑坡结果精度,得出两者沿视线向累积形变量差值的均方根误差为 39.10 mm,最大差值位于 XJ17 点为 56.65 mm。滑坡形变与日降水量及水库水位变化的相关性分析表明,新建滑坡体的形变呈周期性阶跃变化,在出现强降雨或水库水位的骤变后滑坡形变表现出滞后效应。该研究可为山区水库边坡形变监测工作及滑坡灾害预警提供新的高效的方法。

关键词 遥感与传感器; 时序干涉合成孔径雷达技术; 水库边坡; 滑坡监测; 全球定位系统; 滑坡灾害识别

中图分类号 P237、P694、P236

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2428002

Ascending and Descending Time Series Interferometric Synthetic Aperture Radar Monitoring and Analysis of Landslide Deformation

Zhong Bin¹, Liu Zhiyun^{2**}, Li Xiangxin^{1,3*}, LÜ Jiaying¹¹*School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650031, Yunnan, China;*²*Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650000, Yunnan, China;*³*Research Center for Application Engineering of Surveying and Mapping Technology in Plateau and Mountainous Areas, Kunming 650093, Yunnan, China*

Abstract Ascending and descending time series interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology has been used to identify and monitor landslide and deformation of reservoir slopes of a hydropower station on the Jinsha River. It has been found that the landslide areas and deformation trends identified by the approach agree with those of past geological investigation and global position system (GPS) monitoring, which shows that InSAR technology is reliable and useful for landslide monitoring of reservoir slope in mountainous region. Results show that the deformation rate of Xinjian landslide is relatively larger than that of others, with the maximum rate reaching 198.90 mm/a. In the same monitoring period, the root mean square error of the cumulative deformation difference between InSAR and GPS in the line of sight is 39.10 mm, and the maximum difference is 56.65 mm at the XJ17 point. The analysis of the correlation among landslide deformation, daily precipitation and reservoir water level changes shows that the deformation of the Xinjian landslide changes in a periodic step style, which has a lag after heavy rainfall or sudden changes in the reservoir water level. The research can provide a new effective method for landslide monitoring and hazard identification of reservoir slopes in mountainous areas.

Key words remote sensing and sensors; time series interferometric synthetic aperture radar technology; reservoir slopes; landslide monitoring; global position system; landslide hazard identification

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-10-21; 录用日期: 2021-10-25

通信作者: *lxxjpn@qq.com; **327856748@qq.com

1 引言

金沙江流域地质结构复杂,水能资源丰富,是我国最优质的水电基地之一^[1-3]。但山体滑坡也严重威胁到当地居民的日常生活和水利水电等基础设施及工程的安全。因此在金沙江流域沿岸高山峡谷区域开展滑坡灾害隐患的识别和监测具有重要的意义。

传统的滑坡监测方法如水准测量和全球导航卫星系统测量技术(GNSS)等,虽然能够提供精度较为可靠的点位形变观测,但其受空间采样率低、监测范围小、成本高等限制,难以满足对范围大、分布广的滑坡隐患区域进行监测和识别的需求。近年来光学遥感技术被广泛用于滑坡的识别工作中,但该技术易受到云雾天气因素的影响也不能提供丰富的场景变化信息。而新兴的干涉合成孔径雷达(InSAR)测量技术以其覆盖范围广、对地表微小形变敏感、全天时全天候工作的特点,已被广泛应用于地面沉降、山体滑坡、地震形变等领域^[4-9]。戴可人等^[10]利用时间序列 InSAR 技术成功探测到 8 处位于雅砻江流域的滑坡灾害隐患区域。李梦华等^[11]采用像素偏移量追踪法(POT)结合光学卫星影像推导出了白格滑坡的历史位移。张耀等^[12]提出了一种将时间序列 InSAR 技术与经验模型相结合的新方法用于预测潜在滑坡的数量和面积。康雅等^[13]通过设计干涉对选取方法和 InSAR 分段处理技术(SP)有效地抑制大气噪声的影响,并且证明了利用 InSAR 技术能够探测到复杂地形上的缓慢滑坡运动。

陆会燕等^[14]结合光学遥感与 InSAR 技术,成功探测出金沙江流域下游 7 处较为明显的滑坡隐患。Bekaert 等^[15]利用时间序列 InSAR 技术在尼泊尔特里舒利地区成功识别了 6 处缓慢蠕动的山体滑坡。

本文采用 Sentinel-1A 卫星的升降轨合成孔径雷达(SAR)影像,利用小基线集时间序列方法(SBAS-InSAR)对位于金沙江流域中段的某水电站库区边坡进行了滑坡灾害隐患广域识别和探测。由于研究区域地形复杂、海拔落差大、植被覆盖茂密,而 SAR 又采用侧视成像方式,因此利用 InSAR 技术对该区域滑坡的识别与监测还面临着干涉失相干、斜视成像几何畸变、大气延迟、地形效应等挑战^[16]。利用不同轨道的视线向(LOS)形变速度场来减弱 SAR 影像侧视成像引起的几何畸变以及 LOS 对地表形变敏感差异的影响。最后将所得结果与同期的全球定位系统(GPS)监测数据对比验证,进一步分析实验结果以及雷达遥感在水库型滑坡探测中的可靠性与适用性。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

如图 1 所示,该水电站位于金沙江流域中段,电站枢纽工程最大坝高 138 m,水库总库容 $8.82 \times 10^8 \text{ cm}^3$,有效库容 $2.18 \times 10^8 \text{ cm}^3$,具有日调节能力^[17]。在地质构造上,研究区域分布的地层岩性以玄武岩、火山角砾岩、凝灰岩等为主,断层活动严重,土层风化,结构稳定性较差^[18]。由于研究区域地质环境、地形地貌环境、

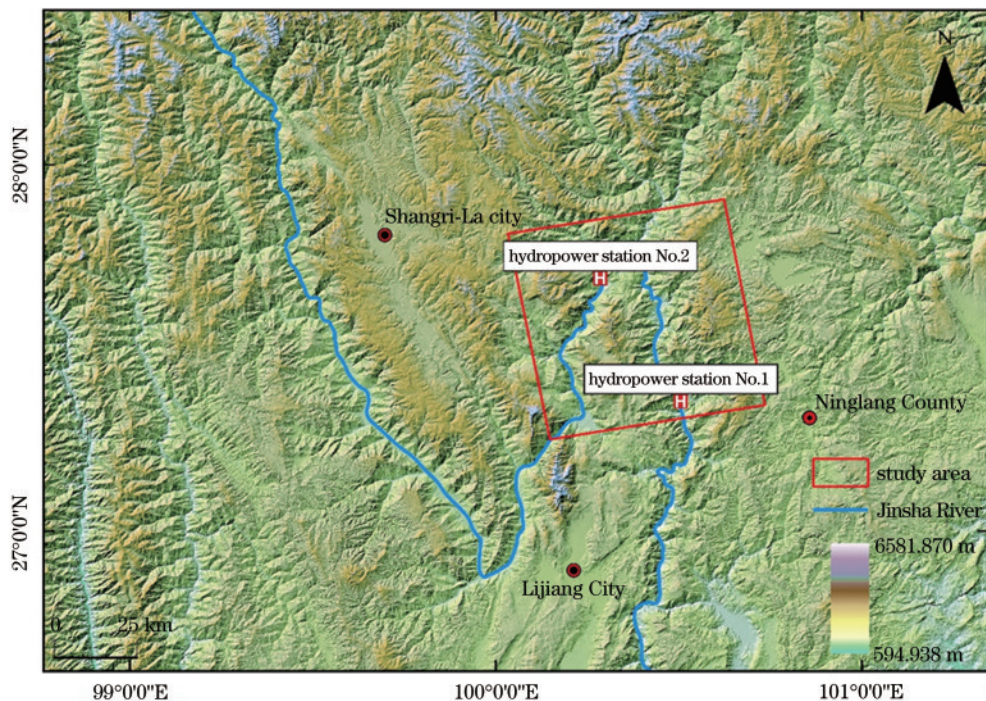


图 1 研究区地理位置图[底图采用日本宇航局发布的全球 30 m 分辨率 AW3D30 数字高程模型(DEM)]

Fig. 1 Geographic location map of study area [base map uses global 30 m resolution AW3D30 digital elevation model (DEM) issued by Japan Aerospace Exploration Agency]

地质构造环境和地层岩性均较复杂,从而导致水库库岸再造和形变失稳问题突出,为滑坡等地质灾害的发生孕育了条件。此外,研究区水文环境同样复杂,每到雨季,受持续强降雨和水库水位变化的影响,研究区内充满了大量的滑坡、崩塌等地质灾害和隐患。

2.2 SAR 数据源

Sentinel-1 是欧盟委员会和欧洲航天局(ESA)共同倡议的全球环境与安全监测系统(GEMS)的重要组成部分,是欧洲航天局发射的由两颗卫星组成的地球观测卫星星座(Sentinel-1A, Sentinel-1B)^[19]。Sentinel-1 载有 C 波段 SAR,可全天时全天候地提供连续影像。表 1 列出了 Sentinel-1A 卫星主要参数以及本研究所用数据的基本情况。

表 1 SAR 数据基本参数
Table 1 Basic parameters of SAR data

Number	Parameter	SAR basic parameter	
1	Orbital direction	Sentinel-1A ascending	Sentinel-1A descending
2	Band	C	C
3	Wavelength /m	5.6	5.6
4	Revisit cycle /d	12	12
5	Heading angle /($^{\circ}$)	347.4	192.6
6	Incident angle /($^{\circ}$)	41.9	39.5
7	Number of images	31	30
8	Coverage period	2018.04.06- 2019.04.13	2018.06.19- 2019.06.14

本研究共计使用了 61 景 Sentinel-1A 卫星数据(其中升轨数据 31 景,降轨数据 30 景),其极化方式为同向垂直(VV)极化,成像模式为宽幅条带式成像。为了减弱由轨道误差引起的相位误差,在数据处理过程中还使用了欧洲空间局精密定轨(POD)轨道数据(POE)对轨道信息进行精化和纠正。

2.3 GPS 数据源

为了对研究区滑坡的历史形变进行监测,于 2012 年 2 月利用 GPS 建立监测网,在该水库周围设置共 21 个控制点,每个滑坡体设置若干个监测点。监测点分为自动监测点和定期监测点,自动监测点实时在线采集监测数据,定期监测点的监测频率为雨季(每年 6~9 月)每月监测一次,非雨季每 3 个月监测一次。图 2 中星型标志表示前期地质调查确定的历史滑坡或堆积体大致位置,由北至南包括里故滑坡体(LG)、拉日滑坡体(LR)、白亚滑坡体(BY)、美古地混合堆积体(MGD)、新建滑坡体(XJ)、古空美滑坡体(GKM)、如子罗滑坡体(RZL)、树枝滑坡体(SZ)、拉丁里滑坡体(LDL)、岩科滑坡体(YK)、东沙坝混合堆积体(DSB)、库枝滑坡体(KZ)、东联混合堆积体(DL)等滑坡隐患。

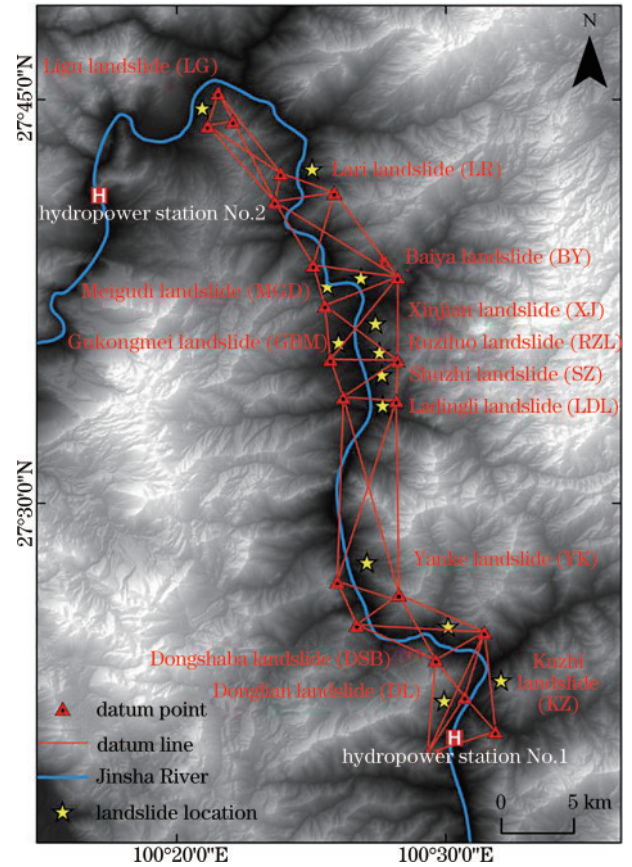


图 2 GPS 基准点点位及滑坡区域大致分布图
Fig. 2 GPS reference point location and approximate distribution of landslide areas

3 研究方法 with 原理

为了改进传统的差分干涉测量技术易受到时间和空间失相干影响的不足,同时减小地形因素对差分结果的影响,Berardino 等^[20]提出了短基线集差分干涉测量技术,即 SBAS-InSAR 技术,其基本原理为:假设已获取同一地区的 $N+1$ 幅 SAR 影像,其时间序列公式如下:

$$\mathbf{T} = [T_1 \ T_2 \ T_3 \ \dots \ T_n]^T, \quad (1)$$

选取其中某一幅影像作为主影像进行配准,则可得到 M 个干涉对,那么 M 满足条件:

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq \frac{N(N+1)}{2}. \quad (2)$$

通过筛选保留相干性好的干涉对,利用获取的 POD 精密轨道数据纠正轨道误差,使用高精度 DEM 数据去除平地相位和地形相位后得到 M 幅差分干涉图以及解缠后的差分干涉相位图。以 T_0 时刻作为初始时刻,假设此时刻研究区域内的形变值为 0,第 k 幅干涉图是由 t_A 和 t_B ($t_A > t_B$) 时刻获得的两幅 SAR 图像产生的,那么第 k 幅干涉图中某个像素点相对于初始点的相位可以表示为

$$\Delta\phi^k = \phi_{t_B} - \phi_{t_A} \approx \Delta\phi_{\text{def}}^k + \Delta\phi_{\text{topo}}^k + \Delta\phi_{\text{atm}}^k +$$

$$\Delta\phi_{\text{noise}}^k (1 \leq k \leq M), \quad (3)$$

式中: $\Delta\phi_{\text{def}}^k$ 表示参考面相位; $\Delta\phi_{\text{topo}}^k$ 表示地形相位, 可以引用外部 DEM 来削弱或去除; $\Delta\phi_{\text{atm}}^k$ 是大气延迟相位; $\Delta\phi_{\text{noise}}^k$ 为噪声相位。又因为

$$\begin{cases} \Delta\phi_{\text{def}}^k(x, r) = \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B) - d(t_A)] \\ \Delta\phi_{\text{topo}}^k(x, r) = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_{\perp} \Delta h}{l \sin\theta} \\ \Delta\phi_{\text{atm}}^k(x, r) = \phi_{\text{atm}}^k(t_B) - \phi_{\text{atm}}^k(t_A) \\ k = 1, 2, \dots, M \end{cases}, \quad (4)$$

式中: (x, r) 为方位-距离像素坐标系的坐标; λ 为雷达波长; $d(t_B)$ 与 $d(t_A)$ 表示该像元在 t_B 、 t_A 时刻相对于初始时刻的雷达 LOS 的形变累积量; B_{\perp} 为垂直基线长度; Δh 为外部 DEM 误差; l 为雷达到目标的斜距; 一般地, 为保证累积形变的连续性, 假设地形形变在各时间间隔内的变化是线性的, 将未知量用相邻时间间隔的相位变化速率 V 来表示, 则有

$$V^T = \left[v_1 = \frac{\phi_1 - \phi_0}{t_1 - t_0} \quad \dots \quad v_N = \frac{\phi_N - \phi_{N-1}}{t_N - t_{N-1}} \right]_{N \times 1}, \quad (5)$$

那么,

$$\begin{cases} \Delta\phi_{\text{def}}^k = \sum_{j=S_k+1}^{E_k} (t_j - t_{j-1}) v_j \\ \forall k = 1, 2, \dots, M \end{cases}, \quad (6)$$

式中: E 表示主影像; S 表示从影像, 假设主影像 (E) 和从影像 (S) 是按时间顺序排列的, 即 $E_S > E_k$ 。因此, 式(6)可以表示为

$$\Delta\phi_{\text{def}} = \mathbf{B}V, \quad (7)$$

式中, \mathbf{B} 为系数矩阵, 矩阵的元素与干涉像对相对应, 其中主影像的系数为 1, 从影像数为 -1, 其他影像系数表示为 0。若不考虑大气延迟相位和噪声相位的影响, 则式(3)可变为

$$\mathbf{B} \times \mathbf{V} + \mathbf{C} \Delta h = \Delta\phi, \quad (8)$$

式中,

$$\mathbf{C}^T = \left[\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp 1}^T \Delta h}{l \sin\theta} \quad \dots \quad \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp M}^T \Delta h}{l \sin\theta} \right]_{M \times 1}, \quad (9)$$

式(8)中, 矩阵 \mathbf{B} 是大小为 $M \times N$ 的矩阵, 当 $M \geq N$ 时, 该式可由最小二乘法得到解; 但当 $M < N$ 时, \mathbf{B} 为欠定矩阵, 为解决其可能存在的矩阵秩亏问题, 引入奇异值分解方法(SVD)求解。

4 结果分析与讨论

4.1 升降轨数据形变速率结果

升轨和降轨数据能够为研究区的形变提供不同 LOS 的监测结果, 互相结合能提供更完整更丰富的边坡形变情况。因此, 通过升降轨 SBAS-InSAR 时间序列技术对该水库库区沿岸边坡进行形变监测, 获得升轨雷达 LOS 上的年平均形变速率图如图 3 所示。利

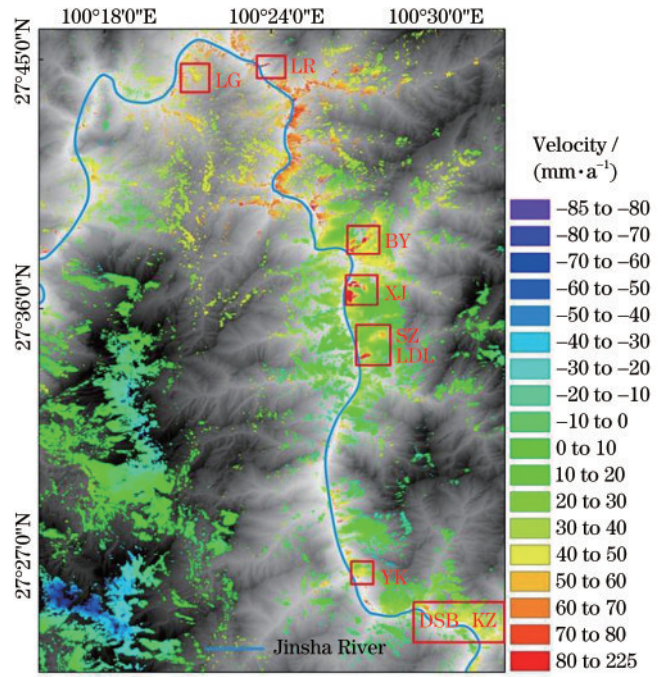


图 3 研究区 LOS 年平均形变速率图(升轨)

Fig. 3 Annual average line-of-sight (LOS) deformation rate in study area (ascending)

用升轨 SAR 数据探测到 9 个滑坡隐患点, 其中新建、里故和白亚滑坡体年平均形变速率较大, 约 146.81~223.53 mm/a。

获得的降轨雷达 LOS 年平均形变速率如图 4 所示, 利用降轨 SAR 数据探测到 5 个滑坡隐患区域, 其中新建及白亚滑坡形变速率在 53.28~105.96 mm/a 之间。

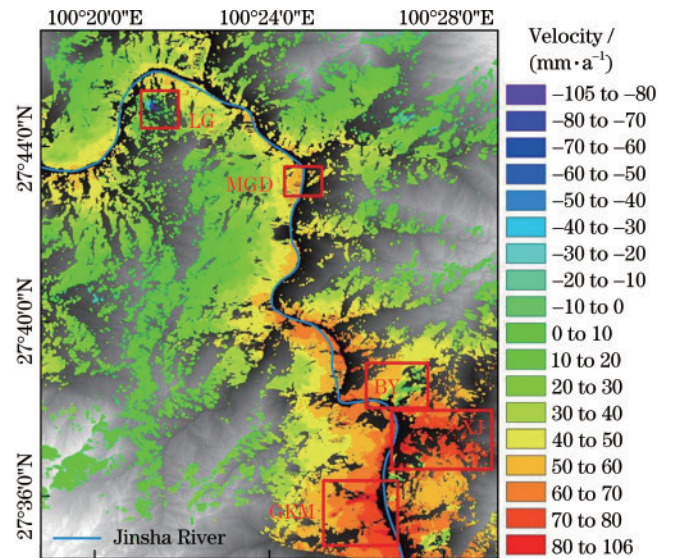


图 4 研究区 LOS 年平均形变速率图(降轨)

Fig. 4 Annual average LOS deformation rate in study area (descending)

对比升降轨监测结果, 其相同之处在于两者都同探测到了里故滑坡、白亚滑坡、新建滑坡等多处滑坡区

域,并且两者年平均形变速率最大的区域都位于新建滑坡体监测点 XJ08 附近。其不同之处主要体现在以下方面:

1) 由于研究区域为金沙江中游两岸边坡,而此段金沙江流向多沿南北向大断裂带,因此金沙江左岸(相对于金沙江流向)边坡多朝西向,右岸边坡大多朝东向。卫星升轨飞行方向大致从南到北,LOS 方向位于右侧,能够很好地将金沙江两侧由西向东的地表形变监测出来,与之不同的是卫星降轨飞行方向大致由北向南,更善于捕捉金沙江两侧由东向西的地表形变。因此升轨数据在金沙江左岸体现出更好的监测性能,例如,新建滑坡位于金沙江左岸,升轨数据获得其 LOS 最大年平均形变速率为 223.53 mm/a,降轨数据获得 LOS 最大年平均形变速率为 105.96 mm/a,通过与同期地质资料以及 GPS 数据投影到 LOS (约 207.01 mm/a)对比,发现升轨数据与之更为接近。而降轨数据在金沙江右岸滑坡识别中表现得更好,探测到了位于金沙江右岸的美古地滑坡体和古空美滑坡体,这是未被升轨数据所探测到的;

2) 针对研究区地形起伏较大,又受该水电站库区地理位置以及雷达侧视成像的影响,InSAR 技术探测结果会出现叠掩、阴影以及透视收缩等几何畸变问题。因此,采用升降轨 InSAR 技术相结合的方式,弥补了单一成像几何的不足,在地形复杂的水库库区能更加准确全面地识别和探测具有滑坡隐患的边坡。

根据升降轨雷达数据可以发现研究区有形变速率较大的几处异常区域,探测结果显示里故滑坡体、白亚滑坡体和新建滑坡体的总体年平均形变速率较大,滑坡体整体表征不稳定,其中又以新建滑坡体形变最为明显。结合已有的历史地质资料分析,发现利用 InSAR 技术探测到的滑坡隐患区域及位置与现有地质调查资料符合,这证明了 InSAR 结果的可靠性。为更好地分析研究区域内滑坡体的形变规律以及产生形变的原因,将新建滑坡体作为重点研究对象。新建滑坡体一方面是形变速率最大的滑坡体,一旦滑坡会造成当地村民的生命及财产安全;另一方面该滑坡体位于金沙江左岸,滑坡面近似朝西向利于使用 InSAR 技术监测,监测结果具有一定的代表性。并且在该区域内获取同时期 GPS 监测点数据较为丰富,便于进行对比验证。

另外,降轨数据在新建滑坡体区域失相干严重,产生失相干的原因可能是短时间内滑坡体发生了较大的形变,当相邻像元间相位差超过 1/2 周期时,InSAR 难以有效监测,因此只采用升轨数据来研究新建滑坡体的形变规律。

如图 5 所示,根据新建堆积体的地形地貌现状及形变监测结果来看,总体可分为三个形变区域, I 号区域为冲沟区域,形变多表现为一系列近平行于沟走向的拉裂缝,部分拉裂缝有错台现象,表明该部分区域向

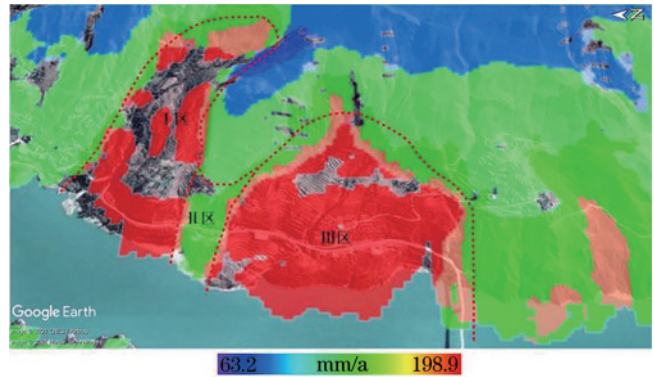


图 5 新建滑坡体年平均形变速率(底图来自 Google Earth)
Fig. 5 Annual average deformation rate of newly built (base map from Google Earth)

江边产生了一定程度的蠕滑形变,顺冲沟产生了较大的滑移形变。III 号区域形变表现为一系列近平行于金沙江走向的拉裂缝,并有错台现象,在上、下游边缘发育一些纵向的剪切裂缝,此区域内产生的滑坡位移最为严重,最大 LOS 年平均形变速率为 198.9 mm/a,滑坡范围约 0.26 km²。II 号区域产生的相较于其他两个区域形变速率较小,区内裂缝不明显,这主要是因为该区后缘为凸出的小山脊,地理位置相对较高,前缘组成物质以崩塌成因的孤块石为主,因此少量的形变在地面的反映不明显。

4.2 GPS 数据验证

图 6 为新建滑坡体监测点及基准点点位分布图,其中有控制点 3 个,自动监测点 4 个(XJ01、XJ08、XJ13 和 XJ16),定期监测点 13 个,后续又增加 XJ18、XJ19、XJ20 监测点。为了便于验证 InSAR 技术监测滑坡结果的准确性,本文将 GPS 数据转换到雷达 LOS 方向并与其做了对比。



图 6 新建滑坡体 GPS 基准点及监测点分布
(底图来自 Google Earth)

Fig. 6 GPS reference points and monitoring points distribution of Xinjian landslide (base map from Google Earth)

通过对比 4 个同名点的 LOS 累计位移量可以发现(图 7),采用 SBAS-InSAR 技术与 GPS 测量技术监测滑坡的形变量在趋势上是极为一致的,但在数值上

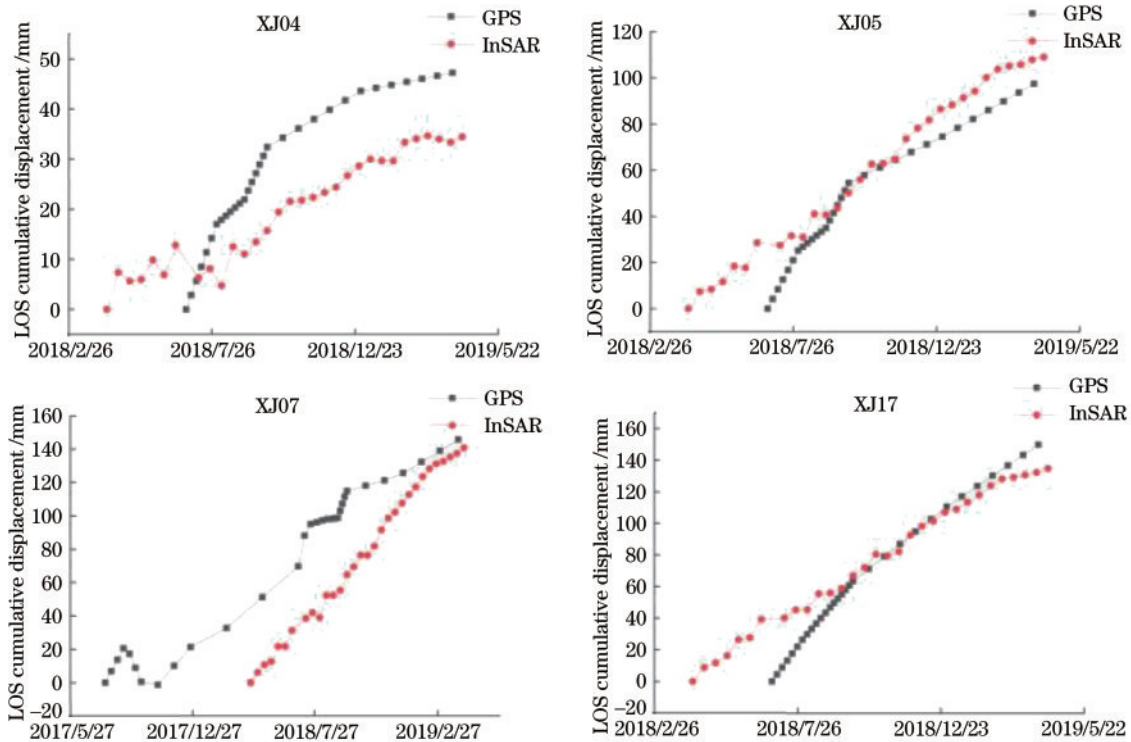


图 7 InSAR 与 GPS 数据 LOS 累积位移量对比

Fig. 7 Comparison of LOS cumulative displacements of InSAR and GPS data

还有一定的差异。这些差异包括在空间和时间尺度上的误差,在空间尺度上,GPS 测量技术所观测的是 GPS 监测点的形变值,而时序 InSAR 监测结果受其距离向及方位向分辨率的影响,其监测结果往往在一个区域内只能得到一个形变值。在时间尺度上,两种数据的观测周期并不相同,不同的观测周期和时间采样分辨率也会给最终的结果带来不可避免的差异。

以 2018 年 6 月 29 日为基准,假设此时各点 LOS 累积位移量为 0,截止到 2019 年 4 月 4 日,计算 InSAR 与 GPS 沿 LOS 的累积形变量的差值,其中差值最大值为 56.65 mm(XJ17),最小值为 3.10 mm(XJ20),差值的均方根误差(RMSE)为 31.90 mm。表 2 数据表

表 2 GPS 与 InSAR 的 LOS 累积形变量对比

Table 2 Comparison of LOS cumulative deformations of GPS and InSAR

Point number	InSAR / mm	GPS / mm	D-value / mm	RMSE / mm
XJN3	27.79	72.82	-45.03	
XJ04	24.23	47.28	-23.05	
XJ05	80.09	97.39	-17.30	
XJ06	90.89	87.17	3.72	
XJ07	103.92	51.38	52.54	31.90
XJ09	59.00	47.54	11.46	
XJ14	29.52	16.35	13.17	
XJ17	93.09	149.74	-56.65	
XJ20	115.02	111.90	3.12	

明,虽然在很多同名点上,InSAR 技术与 GPS 技术监测结果在数值上非常接近,但在不少点位也表现出较大的差异,并且二者监测结果的空间维度并不完全一致。因此,如何将 InSAR 技术更加准确地应用到滑坡监测领域中,还需要进一步的研究和探索。

4.3 滑坡失稳因素分析

本文利用 4 个特征点(P1、P2、P3、P4)的 LOS 累积位移量-时间曲线,结合水库水位变化以及当地日降雨量分析新建滑坡体的形变趋势以及探索影响滑坡体产生形变的因素,由于同时期的水库水位变化数据难以获取,并且每年该水库水位变化规律相仿,所以本文从新建堆积体工程地质勘察报告中获取到了 2012 年 10 月到次年 11 月的奉科段水库水位变化数据,从中国气象局获取到丽江市日降雨量数据。如图 8 所示。

结果显示,每年汛期,即每年 5~10 月,受汛期降雨的影响,形变曲线就出现多个明显的形变增长阶坎,汛期结束后,形变又逐渐恢复平稳。整个形变曲线表现为阶梯状演化特征,表现出稳定(S)-加速(A)-稳定(S)-加速(A)-稳定(S)的周期性变化规律。

通过对比水库水位变化曲线以及丽江市日降雨量与新建滑坡体累计位移量曲线的关系,可以看出水库水位骤升骤降时,滑坡形变有所增加,且位移滞后现象较明显。如 2013 年 8 月 31 日到 9 月 8 日水库水位上涨 7.62 m,对应 2018 年 10 月 4 日到 10 月 16 日特征点 P4 累积形变为 9.77 mm。数据表明,该点出现明显形变加速过程比水库水位变化滞后约一个月。同时,该时

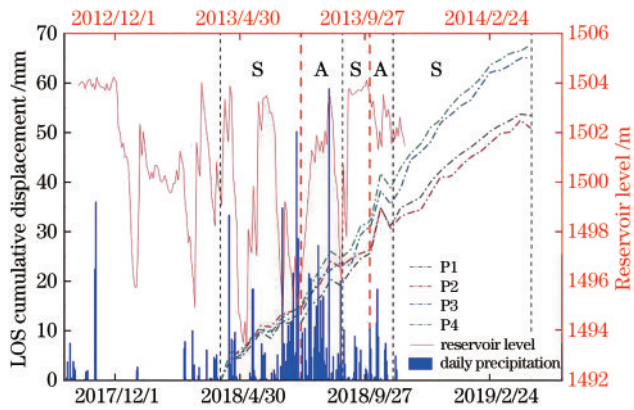


图 8 奉科段水库水位变化以及丽江市日降雨量与新建滑坡体特征点累计位移量关系图

Fig. 8 Relationship between water level change of Fengke Reservoir and daily rainfall in Lijiang City and cumulative displacement of characteristic points of Xinjian landslide

段 P4 点的日均形变速率为 $0.81 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 对比其全年的日平均形变速率 $0.18 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 出现明显的跃迁。探究特征点形变规律发现, 滑坡体的形变与水库水位的骤然变化存在相关性。因为滑坡体在地下水位与水库水位之间的渗透性很大, 地下水位越靠近河流, 地下水对水位波动越敏感, 引发滑坡形变的幅度越大。随着水库水位的升高, 地下水位也随之升高, 滑坡体孔隙压力增大, 并且地下水对滑坡体的软化作用降低了滑坡体的抗剪强度, 这也将加速滑坡的形变^[21]。而当地下水水位随着水库水位的降低而下降时, 一方面边坡底部的浮力减小; 另一方面, 滑坡体内的地下水位是高于水库水位的, 由于孔隙水短时间内无法排出滑坡体内部, 因而降低了潜在滑动面的抗滑能力, 并增加了滑坡体的滑动力。

另外, 每次强降雨后, 特征点累计位移-时间曲线就会出现一次时间滞后的阶跃, 汛期过后, 滑坡形变又回复到平稳状态, 宏观上仍保持相对固定的形变速率。这说明滑坡形变与降雨量呈正相关关系。在雨季, 由于雨水渗入滑坡, 风化的黏土和石灰石中含有大量的遇水膨胀物质。当黏土浸水膨胀时, 不仅增加了滑体自重, 还降低了颗粒间的黏结力, 降低或软化了滑体的抗剪强度, 产生扰动, 然后加速滑坡体的形变。

5 结 论

通过时间序列 InSAR 技术对金沙江流域某水库库区边坡进行了滑坡灾害隐患广域识别和探测, 并通过 SBAS-InSAR 技术重点分析了新建滑坡体地表位移的时空特征, 揭示了其滑坡形变规律。在地形复杂的水库边坡以及山地峡谷区域, 采用不同轨道数据结合的方式可以有效补偿单一成像几何带来的几何畸变问题。通过使用升降轨 InSAR 技术结合的方式共探测到该水库库区 11 处滑坡隐患区域, 其中新建滑坡体

的最大雷达 LOS 年平均形变速率可达 198.90 mm/a 。同时, 利用滑坡隐患历史资料以及 GPS 数据与 InSAR 探测结果进行了进一步的验证与对比分析发现, 两种监测技术检测滑坡隐患的地理位置大致相同, 说明 InSAR 技术在探测和识别库区滑坡及滑坡隐患具有优势与适用性。

为进一步探究滑坡体的形变规律, 引入了水库水位变化曲线和日降雨量曲线与新建滑坡体特征点 LOS 累计位移量-时间曲线联合分析, 发现在水库水位的反复涨落和强降雨的作用下, 滑坡表现出周期性加速特征。另外, 在每一次出现较大的加速滑坡后, 特征点的累计位移-时间曲线还表现出一定程度的位移回弹趋势, 这一现象还需要结合更多的地质资料以及滑坡原理来进一步解释。

该水库库区的边坡发生滑坡会对当地居民的生命财产安全存在严重的威胁, 同时也会影响水利水电等基础设施的正常运转, 还会有在金沙江形成堰塞湖的危险。因此, 结合升降轨 InSAR 技术识别和探测该库区边坡稳定性研究滑坡的规律和趋势, 可为水库型滑坡灾害隐患的广域识别提供范例与思路, 为当地的防灾减灾工作提供有力的支持。

致谢 感谢中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院以及昆明理工金图科技有限公司提供的 GPS 形变观测数据支持。

参 考 文 献

- [1] 朱赛楠, 殷跃平, 王猛, 等. 金沙江结合带高位远程滑坡失稳机理及减灾对策研究: 以金沙江色拉滑坡为例 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(4): 688-697.
Zhu S N, Yin Y P, Wang M, et al. Instability mechanism and disaster mitigation measures of long-distance landslide at high location in Jinsha River junction zone: case study of Sela landslide in Jinsha River, Tibet [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(4): 688-697.
- [2] 欧作畿. 浅析金沙江中游河段梯级电站区域构造稳定性 [J]. 云南水力发电, 1996, 12(3): 8-16.
Ou Z J. Elementary analysis of the regional tectonic stability at the cascade stations along the middle reach of Jinshajiang River [J]. Yunnan Water Power, 1996, 12(3): 8-16.
- [3] 肖白云. 建设溪洛渡水电站加快金沙江水能资源开发 [J]. 水力发电, 1997, 23(11): 1-4, 19.
Xiao B Y. Constructing Xiluodu hydropower station and speeding up the development of Jinsha river hydropower resources [J]. Water Power, 1997, 23(11): 1-4, 19.
- [4] 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.
- [5] 陈兴芳, 张福存, 王晓东, 等. 基于时序 InSAR 技术的山体滑坡灾害监测研究 [J]. 测绘工程, 2020, 29(5): 45-49.

- Chen X F, Zhang F C, Wang X D, et al. Research on the landslides disaster based on time series InSAR technique[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2020, 29(5): 45-49.
- [6] 曾琳, 铁永波, 管威, 等. 雷达遥感探测甲居滑坡蠕滑形变与潜在失稳因素分析[J]. *四川地质学报*, 2021, 41(1): 140-145.
- Zeng L, Tie Y B, Guan W, et al. Detection of creep deformation of the Jiaju landslide by radar remote sensing and potential instability factors[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2021, 41(1): 140-145.
- [7] 刘芳华, 贺岩, 罗远, 等. 基于光子计数激光雷达的运动小目标测距测速系统[J]. *中国激光*, 2021, 48(13): 1310001.
- Liu F H, He Y, Luo Y, et al. Moving target distance and velocity measurement system based on photon-counting lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(13): 1310001.
- [8] 朱首正, 卜令兵, 刘继桥, 等. 机载高光谱分辨率激光雷达探测大气气溶胶光学特性及污染研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(17): 1710003.
- Zhu S Z, Bu L B, Liu J Q, et al. Study on airborne high spectral resolution lidar detecting optical properties and pollution of atmospheric aerosol[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(17): 1710003.
- [9] 于思琪, 刘东, 徐继伟, 等. 激光雷达反演大气边界层高度的优化方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(7): 0728002.
- Yu S Q, Liu D, Xu J W, et al. Optimization method for planetary boundary layer height retrieval by lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0728002.
- [10] 戴可人, 铁永波, 许强, 等. 高山峡谷区滑坡灾害隐患 InSAR 早期识别: 以雅砻江中段为例[J]. *雷达学报*, 2020, 9(3): 554-568.
- Dai K R, Tie Y B, Xu Q, et al. Early identification of potential landslide geohazards in alpine-canyon terrain based on SAR interferometry—a case study of the middle section of Yalong river[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(3): 554-568.
- [11] Li M H, Zhang L, Ding C, et al. Retrieval of historical surface displacements of the Baige landslide from time-series SAR observations for retrospective analysis of the collapse event[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 240: 111695.
- [12] Zhang Y, Meng X M, Dijkstra T A, et al. Forecasting the magnitude of potential landslides based on InSAR techniques[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 241: 111738.
- [13] Kang Y, Lu Z, Zhao C Y, et al. InSAR monitoring of creeping landslides in mountainous regions: a case study in Eldorado National Forest, California[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 258: 112400.
- [14] 陆会燕, 李为乐, 许强, 等. 光学遥感与 InSAR 结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2019, 44(9): 1342-1354.
- Lu H Y, Li W L, Xu Q, et al. Early detection of landslides in the upstream and downstream areas of the Baige landslide, the Jinsha River based on optical remote sensing and InSAR technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1342-1354.
- [15] Bekaert D P S, Handwerger A L, Agram P, et al. InSAR-based detection method for mapping and monitoring slow-moving landslides in remote regions with steep and mountainous terrain: an application to Nepal[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 249: 111983.
- [16] 李振洪, 宋闯, 余琛, 等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用: 挑战与对策[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2019, 44(7): 967-979.
- Li Z H, Song C, Yu C, et al. Application of satellite radar remote sensing to landslide detection and monitoring: challenges and solutions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 967-979.
- [17] 夏元康, 杨延伟, 夏传明. 阿海水电站施工防洪和水库运行水位站建设实践分析[J]. *中国水运*, 2013, 13(1): 163-164.
- Xia Y K, Yang Y W, Xia C M. Analysis of Ahai hydropower station's construction flood control and reservoir operation water level station construction practice[J]. *China Water Transport*, 2013, 13(1): 163-164.
- [18] 叱伟康, 李向新, 李鹏飞. 基于 GPS 的山区水库边坡滑坡体变形监测[J]. *地质灾害与环境保护*, 2018, 29(1): 9-12.
- Chi W K, Li X X, Li P F. Reservoir slope deformation monitoring based on GPS[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2018, 29(1): 9-12.
- [19] 杨魁, 杨建兵, 江冰茹. Sentinel-1 卫星综述[J]. *城市勘测*, 2015(2): 24-27.
- Yang K, Yang J B, Jiang B R. Sentinel-1 satellite overview[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2015(2): 24-27.
- [20] 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.
- [21] 向家松. 复杂结构滑坡中地下水位对库水位波动的响应规律及其应用: 以三峡库区秭归—万州段大型滑坡为例[D]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- Xiang J S. The response law of groundwater dynamics to fluctuation of reservoir water level in complex landslide structures and its application: taking Zigui-Wanzhou large landslides in the Three Gorges reservoir area as an example[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.