

doi: 10. 20008/j. kckc. 202402014

基于InSAR技术溪洛渡库区活动滑坡形变特征研究

李启亮^{1,3}, 孙永彬^{1,2,3}, 王诩^{1,3}, 汪冰^{1,2,3}, 邓国武^{1,2,3}, 张策^{1,3}

(1. 核工业航测遥感中心, 河北 石家庄 050002; 2. 河北省航空探测与遥感技术重点实验室, 河北 石家庄 050002;
3. 高分辨率对地观测系统河北数据应用技术支持中心, 河北 石家庄 050002)

摘要 水电站建设会在一定程度上改变当地自然环境, 特别是库区蓄水影响着库区岸坡稳定性, 造成库区古滑坡的复活及(或)潜在活动滑坡的失稳, 为库区带来了新的地质环境问题。本文以溪洛渡水电站库区为例, 采用时序SBAS-InSAR技术对库区活动滑坡隐患的变形特点和发生模式进行了识别研究。结果表明: 结合升降轨数据共发现库区存在16处活动滑坡隐患, 滑坡不同位置表现出不同的形变速率, 均呈现整体向下蠕滑的趋势, 发生模式以牵引式滑坡居多。受到库区蓄水、流水侵蚀及汛期降雨的影响, 溪洛渡库区地质灾害诱发条件将发生变化, 需进一步加强地质灾害监测工作。

关键词 溪洛渡库区; SBAS-InSAR; 地表形变探测; 活动滑坡

中图分类号: TP79 文献标志码: A 文章编号: 1674-7801(2024)02-0311-10

Deformation characteristics of active landslides in Xiluodu reservoir area based on InSAR technology

LI Qiliang^{1,3}, SUN Yongbin^{1,2,3}, WANG Shen^{1,3}, WANG Bing^{1,2,3}, DENG Guowu^{1,2,3}, ZHANG Ce^{1,3}

(1. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, Hebei, China; 2. Key Laboratory of Airborne Survey and Remote Sensing, Shijiazhuang 050002, Hebei, China; 3. High-resolution Earth Observation System Data Application Technical Support Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050002, Hebei, China)

Abstract: The construction of hydropower station will change the local natural environment to a certain extent, especially the reservoir water will affect the stability of the bank slope of the reservoir area, resulting in the revival of the ancient landslide or the instability of the potential active landslide, which brings new geological environment problems to the reservoir area. Taking Xiluodu Hydropower Station reservoir area as an example, this paper uses time-series SBAS-InSAR technology to identify and study the deformation characteristics and occurrence

[收稿日期]2022-02-07; [修回日期]2022-06-08

[基金项目]本文受“2020年度云南省重点区域地质灾害(隐患)精细化调查与风险评价”项目(YNLH202011010793)资助。

[第一作者简介]李启亮,男,1993年生,硕士,助理工程师,从事InSAR技术与应用、遥感地质工作;E-mail:leaqiliang@163.com。

[引用格式]李启亮,孙永彬,王诩,汪冰,邓国武,张策. 2024. 基于InSAR技术溪洛渡库区活动滑坡形变特征研究[J]. 矿产勘查, 15(2): 311-320.

Li Qiliang, Sun Yongbin, Wang Shen, Wang Bing, Deng Guowu, Zhang Ce. 2024. Deformation characteristics of active landslides in Xiluodu reservoir area based on InSAR technology[J]. Mineral Exploration, 15(2): 311-320.

patterns of active landslide hidden danger in the reservoir area. The results show that there are 16 active landslide hidden dangers in the reservoir area combined with the lifting rail data. Different positions of the landslide show different deformation rates, and all showed an overall downward creep trend, and the occurrence patterns are mostly traction landslides. Affected by water storage, water erosion and rainfall in flood season, the induced conditions of geological disasters in Xiluodu reservoir area will change, and geological disaster monitoring needs to be further strengthened.

Keywords: Xiluodu reservoir area; SBAS-InSAR; surface deformation detection; active landslide

0 引言

水电站为社会经济发展做出了巨大贡献,但其建设在一定程度上也改变了当地自然环境,特别是库区蓄水影响着库区岸坡稳定性,造成库区古滑坡的复活及(或)潜在活动滑坡的失稳,为库区带来了新的地质环境问题(戚赏等,2020)。近年来国内加强了地质灾害的监测与防治工作,监测技术方法也得到了快速发展与完善。特别是雷达遥感技术的快速发展,在地面沉降、滑坡、崩塌及泥石流调查监测方面得到了广泛应用。

除雷达技术之外,RTK、GNSS等测量技术虽然在单点上监测精度高,实时性好,但投入资金大、监测范围局限,难以达到大区域范围内高效监测目的。高空间分辨率光学遥感技术也可以根据滑坡的影像标志特征来解译识别滑坡隐患,但在植被高覆盖和地表裸露等地区,滑坡解译准确性较低(赵超英等,2019;代聪等,2020),同时也获取不到形变信息。合成孔径雷达干涉测量技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR),可探测雷达视线方向的微小形变,探测精度达厘米级甚至毫米级(Rizo and Tesauro, 2000; 葛大庆等,2008; Guo et al., 2017; 张路等,2018; 陆会燕等,2019),为准确识别滑坡隐患提供了重要支撑。

溪洛渡水电站处于长江上游金沙江流段。该区域河道落差大、水量丰沛稳定,水能资源潜力巨大,是中国最大的水电能源基地,近十几年来相继建成白鹤滩、向家坝大型水电站。在溪洛渡水电站建成后的2013年,库区永善县易子村发生滑坡,约12万m³滑坡体滑入库区激起巨浪造成雷波县卡哈罗乡遭受次生灾害,造成了重大人员伤亡和财产损失。在溪洛渡水电站区域范围内,国内学者在地质灾害方面开展了较多研究。李秀珍等(2010)分析了溪洛渡库区岸坡典型滑坡分布、规模和形态特

征,邓宏艳和王成华(2011)对库区典型滑坡进行了稳定性动态评价,李凌婧等(2015)利用采用InSAR技术开展了库区易子村大型滑坡蓄水前、后变形监测研究,刘仕勇和李攀峰(2018)利用地表位移监测站监测数据分析了库区干海子滑坡、雨林2组滑坡堆积变形破坏现象及其演化特征,刘星洪等(2018)利用多种InSAR数据开展了库区西岸雷波县活动性地质灾害数量及分布规律研究。本文以溪洛渡库区为例,采用时间序列的SBAS-InSAR技术,利用Sentinel-1A升、降轨雷达卫星数据,在前人研究基础上重点研究2019—2020这2年期间库区滑坡不同发生模式(牵引式、推移式)的形变特征,以期为库区防灾减灾提供技术支撑。

1 研究区概况

溪洛渡水电站位于四川省雷波县与云南省永善县接壤的金沙江峡谷段,2013年7月建成并正式投产,主要功能是发电、防洪、拦沙和改善下游航运,总装机容量1386万kW,大坝为混凝土双曲拱坝,最大坝高285.5m,坝顶高程610m,水库正常蓄水位600m,库容126.7亿m³,全长197km(周围和沈习文,2012)。研究区位于溪洛渡坝址至库区上游80km范围内,涉及永善县溪洛渡镇、务基镇和华山镇,以及四川省五官乡、卡哈洛乡和元宝山乡等11个乡镇。

研究区为强侵蚀高山、中山地貌区,地势总体西高东低,山岭海拔高程2000~3500m(图1)。区内金沙江呈北东向深切其间,“V”型谷发育,地形起伏大,植被茂密。区内属亚热带季风气候,多年平均降雨量586.3~851.2mm,5—10月占全年降雨量的85%~90%,日最大降雨量超过100mm(朱吉龙,2019)。

区内地层展布受北东向莲峰断裂和南北向峨边—金阳断裂控制,奥陶系—志留系以薄层互层状

结构的砂岩、粉砂岩及泥页岩为主,河谷地带分布第四系松散的冲积物和残坡积物(马振福,1987^①)。受复杂地形地貌、地质条件等孕灾条件的影响,区内崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害高易发。其中滑坡和崩塌最为发育,多分布于 15°~25° 的缓

坡上,以土质滑坡为主,滑动面多为松散层与基岩的接触界面,多发育浅层滑坡。受库区蓄水工程的影响,库区边坡稳定性发生了很大变化,库区两岸崩塌、滑坡地质灾害呈现出新的变化特点。

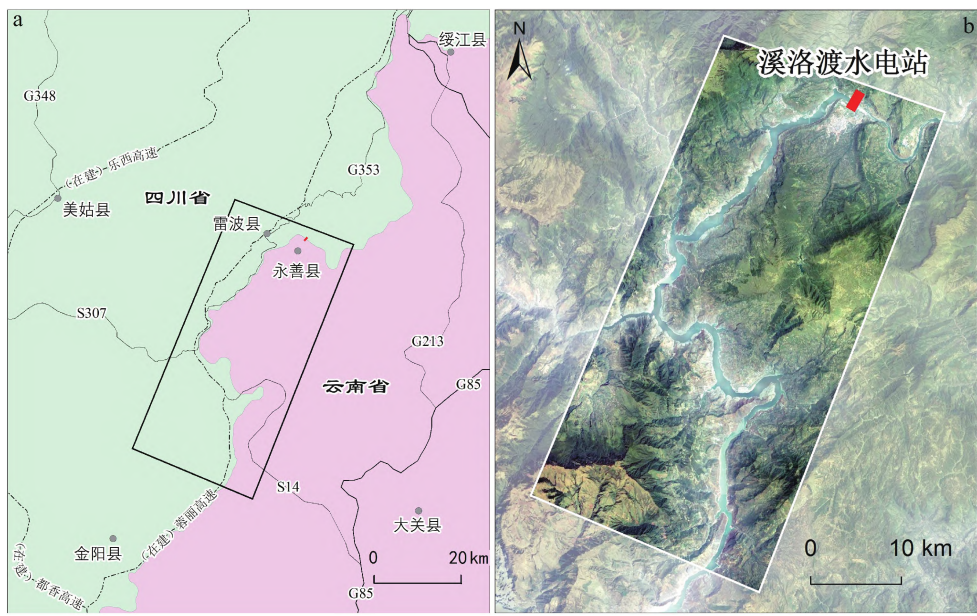


图 1 研究区交通位置图(a)和高分遥感影像图(b)

2 数据与方法

2.1 数据源

研究数据采用 Sentinel-1 雷达卫星数据,采用 C 波段载荷,该卫星重访时间为 12 d, IW 模式覆盖范围 250 km,分辨率为 5 m×20 m(距离向 5 m,方位向 20 m)。本文选用 2019 年 1 月 1 日—2020 年 12 月 31

日覆盖研究区的干涉宽幅模式的斜距单视复数产品,升轨数据 120 景,降轨数据 60 景,共 180 景,同时收集了相对应的精密轨道文件(表 1)。遥感影像选择 2020 年 7 月 22 日的高分一号卫星数据 1 景,经预处理并影像融合后得到分辨率为 2 m 遥感影像(图 1)。DEM 数据选择美国地质调查局提供的 30 m 分辨率的 SRTM 数据。

表 1 Sentinel-1A 数据基本信息

轨道	轨道方向	时间范围	景数	成像模式	方位角/°	入射角/°
128~89	升轨	2019 年 1 月 1 日—2020 年 12 月 31 日	120	IW 干涉宽幅	-12.62	39.62
128~84						
62~499	降轨		60	IW 干涉宽幅	192.60	37.02

2.2 SBAS 形变信息提取

SBAS(Small Baseline Subsets)是短基线集差分干涉测量技术,将所有 SAR 影像根据子集间干涉对空间基线距相对较大,子集内干涉对空间基线距相对较小的原则进行自由组合,形成若干短基线集合,建立干涉相对连接图,并利用空间基线阈值法

选取短基线干涉对,削弱空间失相关的影响(陈富龙等,2013)。地理配准过程中将所有干涉对进行联合配准并重采样,对每个干涉对进行 D-InSAR 处理,根据每个干涉对的相干图质量进行检查并筛选干涉图。使用相干性较好的干涉对作为地表形变反演的最终数据,引入奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)和最小二乘法进行相位解缠,

获得最终的变形结果(Chen et al. ,2018)。根据小基线集集合间SAR影像的基线较大、集合内基线较小的原则,时间基线设置为24 d,空间基线阈值设置为极限基线的2%,短基线可以有效减少几何失相干DEM误差带来的不利影响。InSAR实验数据使用GAMMA软件平台进行处理,时间序列InSAR分析使用开源的MintPy软件包(Yun et al. ,2019)。

3 活动滑坡识别与特征研究

3.1 库区形变信息特征

短基线集差分干涉测量技术获取的形变速率图中研究区整体呈现淡蓝绿色,库区库岸局部显示出橙红色,表示该区域地表在LOS方向(即卫星的视线方向)上向卫星的反方向移动,即存在下沉趋势;深蓝色区域与之相反。

由于Sentinel-1A卫星的侧视成像原理,雷达信号无法抵达的坡体背侧就会出现阴影,若首先抵达山地而后山底就会出现顶底倒置和叠掩等畸变现象,经地理编码后像素被拉升并形成条纹,其值不表示真实地表形变信息。因此,升轨数据探测到的滑坡集中于库区西岸和坡向朝东的坡体上,降轨数据探测到的滑坡集中于库区东岸和坡向朝西的坡体上。

从形变速率图中得知,库区两岸边坡整体稳定,但分布16处较明显形变区(编号H01-H16),形变区域在2019—2020年间存在持续的地表形变迹象,集中分布在金沙江两岸的一级斜坡、金沙江两岸二级沟谷及支流的二级斜坡上,已知的干海子滑坡(李攀峰等,2016)、易子村滑坡(李凌婧等,2015)和建设村滑坡(刘星洪等,2018)分别位于形变区H01,H06和H13处(图2)。

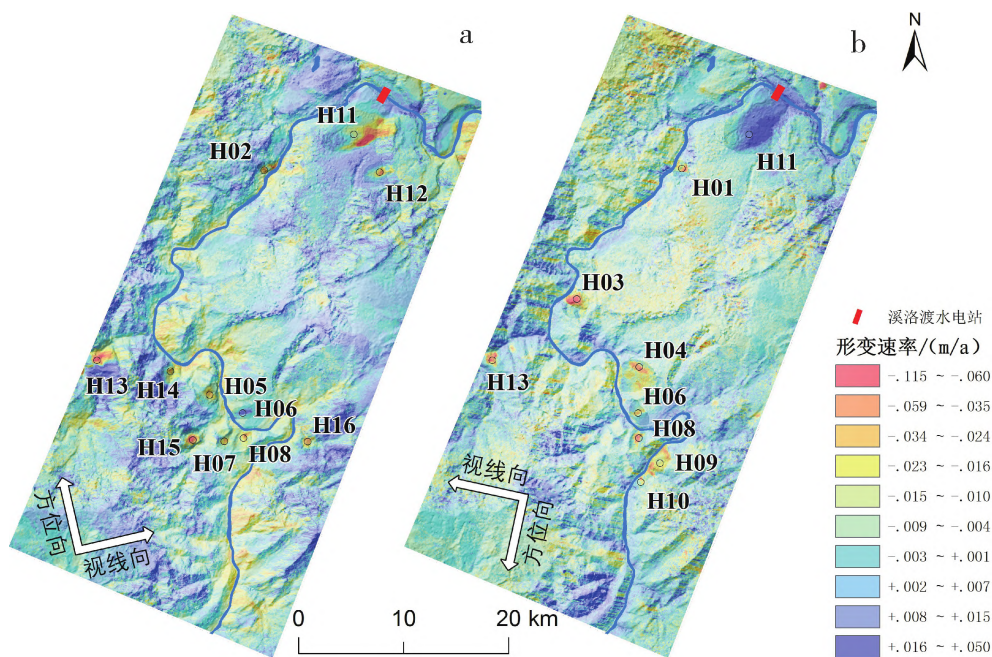


图2 研究区年均形变速率图(a:升轨,b:降轨)

3.2 库区活动滑坡综合识别

结合高分遥感影像和年均升降轨形变速率图共同分析,研究区内16处形变区域为活动滑坡,集中分布在库区两岸的坡体上。其中,升轨数据探测到12处活动滑坡;降轨数据探测到10处活动滑坡;升轨和降轨形变速率图均能探测到的有5处滑坡。升轨数据视线方向上滑坡范围内的形变速率为 $-11.52 \sim 4.31$ cm/a,平均值为 -1.71 cm/a;降轨数据

视线方向上滑坡范围内的形变速率为 $-11.27 \sim 6.41$ cm/a,平均值为 -0.27 cm/a。水电站上游32~68 km,金沙江出现多处弯曲,导致流水对两岸边坡的侵蚀和侧蚀作用更强,因此该段地质灾害分布、密度较大。溪洛渡库区凹岸分布有13处活动滑坡,通过汇总学者研究成果(邓宏艳和王成华,2011),滑坡推测方量 18071 m^3 ;凸岸分布有3处活动滑坡,滑坡推测方量 8547 m^3 ,表明河流凹岸受到流水侵蚀作用较凸岸更强,凹岸坡体上滑坡更为发育。

表 2 研究区内 InSAR 探测的活动滑坡信息统计

编号	名称	与河流位置	推测方量/m ³	轨道	形变均值/(cm/a)		发生模式	光学影像标志	威胁对象
					升轨	降轨			
H01	干海子滑坡	凹岸	4760.0	降轨	-	-1.58	推移式	圈椅状	金沙江
H02	杨家湾滑坡	凹岸	75.5	升轨	-2.46	-	牵引式	圈椅状	金沙江
H03	耳子山滑坡	凹岸	611.9	降轨	-	-3.28	牵引式	冲沟多发育	金沙江
H04	堰塘湾滑坡	凹岸	622.8	降轨	-	-1.83	推移式	双沟同源	金沙江
H05	洗马溪山滑坡	凹岸	238.0	升轨	-1.8	-	牵引式	双沟同源	金沙江
H06	易子村滑坡	凸岸	7891.4	升降轨	0.51	-0.48	牵引式	长舌状,边界特征明显	金沙江
H07	牛滚凼滑坡	凹岸	7624.5	升轨	-1.66	-	牵引式	圈椅状	卡哈洛沟
H08	曾家湾子滑坡	凹岸	248.6	升降轨	-1.89	-2.25	牵引式	圈椅状	金沙江
H09	白沙碛变形体	凸岸	384.0	降轨	-	-1.84	牵引式	冲沟多发育	金沙江
H10	四方石滑坡	凸岸	271.7	降轨	-	-0.64	牵引式	圈椅状	金沙江
H11	永善县城南部滑坡	凹岸	2539.3	升降轨	-1.58	2.21	牵引式	长舌状,双沟同源	溪洛渡沟
H12	双凤村滑坡	凹岸	216.3	升轨	-1.91	-	牵引式	双沟同源	溪洛渡沟
H13	建设村滑坡	凹岸	413.6	升降轨	-2.83	-2.03	牵引式	圈椅状	溜筒河
H14	新场沟口滑坡	凹岸	81.0	升轨	-2.17	-	牵引式	圈椅状	新场沟
H15	卡哈洛村滑坡	凹岸	410.2	升轨	-2.41	-	牵引式	圈椅状	卡哈洛沟
H16	黑铁箐滑坡	凹岸	229.7	升轨	-2.04	-	牵引式	双沟同源	黑铁箐沟

16处活动滑坡中大部分以牵引式为主,推移式较少,其中牵引式滑坡14处,推移式滑坡2处。这正是受到库区蓄水影响,水体对岸坡前缘的岩石产生显著的浸蚀作用,岸坡前缘稳定性变差,牵引滑坡体向下滑动(张利芹等,2020;刘秋强等,2021)。同时,牵引型滑坡的形变量和形变速率的绝对值均值稍大于推移式滑坡,其中在降轨数据中牵引式滑坡形变速率绝对值均值为1.82 cm/a,推移式滑坡形变速率绝对值均值为1.70 cm/a,升轨数据中牵引式滑坡形变速率绝对值均值为1.93 cm/a,而推移式滑坡在升轨数据中未观察到形变信息(表2)。

3.3 活动滑坡特征分析

在探测到的16处活动滑坡中,选取区内3处典型滑坡作为案例,探究2种滑坡发生模式(牵引式和推移式)在InSAR形变图中的特点,分析滑坡变形的分布对发生模式产生的不同影响,详细分析滑坡不同部位不同形变速率下时间序列上的变化特征,并归纳总结该滑坡的形变规律。

3.3.1 牵引式滑坡

(1)易子村滑坡(H06)

易子村滑坡位于云南省永善县黄华镇西部金沙江右岸,距坝体河道里程50.6~51.0 km,属于古

滑坡堆积体坡脚次级滑坡,古滑坡体长约4500 m,宽约1800 m。滑动层为土石质老滑坡堆积层,基岩为弱透水性志留系泥页岩(邓宏艳和王成华,2011),地层倾向近水平(李秀珍等,2010)。现今形变区与滑坡体长约1300 m,宽280~400 m,地形坡度约10°~35°,发育多级平台。2013年7月27日在永善县黄华镇发生的山体滑坡即该滑坡。

研究截取了易子村滑坡2019-1-1—2020-12-31降轨影像LOS方向形变速率图(图3),叠置在该滑坡的影像上可观察到,滑坡侧壁和后壁均呈现较稳定状态,滑坡体即为形变区域,滑坡体形变速率较周围出现明显下沉趋势。

为进一步研究滑坡体典型点位时间序列形变量特征,选取了滑坡体后缘、中部、前缘3处特征点,研究两年的形变量时间序列累积曲线特征(图4),点号分别为p1、p2、p3,形变速率分别为-3.27 cm/a、-7.61 cm/a和-6.09 cm/a,3处特征点均为过滤挑选后得出,点处均发育土石质老滑坡堆积层碎石土,基岩为奥陶系一志留系薄层泥页岩,透水性较差,稳定性一般。在该时间内,3个特征点均呈现出下沉趋势,其中p2、p3较p1点累积形变量较大,显示出滑坡体主要形变区域集中于中部及前缘。2019年1—6月,3处特征点同步下沉,形变速率为-7.9~

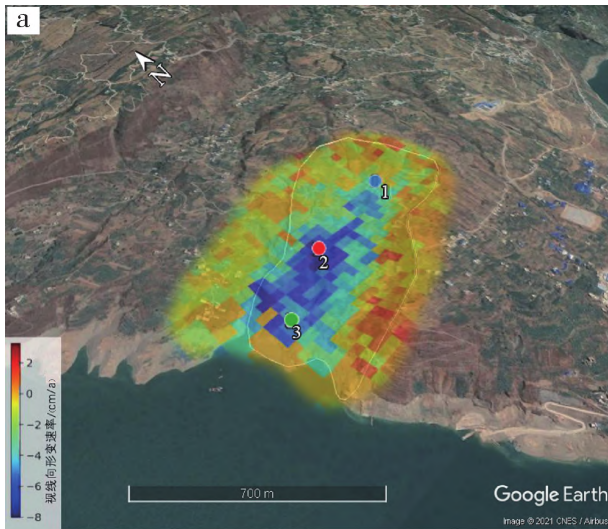


图3 易子村年均形变速率图(a)与遥感影像图(b)

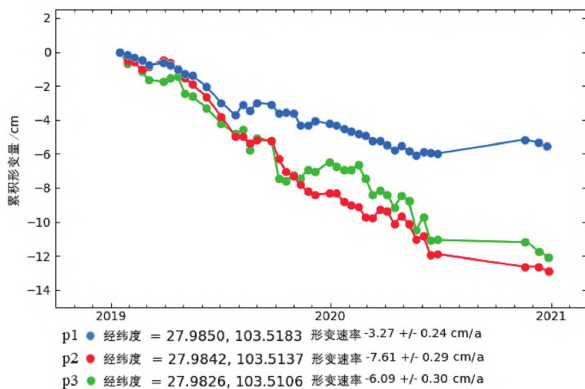


图4 易子村滑坡3处特征点地表形变时间序列变化曲线图

-8.8 cm/a, 进入2019年汛期以后, 滑坡后缘形变速率放缓, 滑坡中部和前缘形变速率仍较匀速下沉, 出现明显的分化。2020年6月之后, 该滑坡整体下

沉趋势放缓并处于较稳定态势。

综合分析表明, 该滑坡前缘、中部受水库蓄水和水流侧蚀作用的影响, 较滑坡体后缘最先失稳, 牵引整个滑坡向下蠕动, 属于牵引式滑坡。目前形变趋势虽稳步放缓, 但仍对金沙江该段两岸存在威胁。

(2) 建设村滑坡(H13)

建设村滑坡位于距坝体河道里程37.3 km的金沙江支流溜筒河右岸, 距该河注入金沙江河口5.0~6.6 km, 位于四川省雷波县巴姑乡。滑坡长950~1100 m, 宽约900 m, 圈椅状特征较明显, 建设村位于滑坡区上部, Y032乡道从滑坡中部穿过并以“人”字形盘旋至坡顶。

研究截取了建设村滑坡2019-1-1—2020-12-

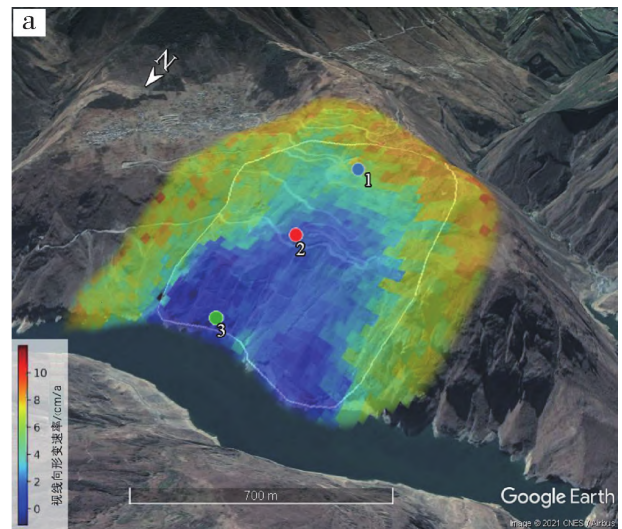


图5 建设村滑坡年均形变速率图(a)与遥感影像图(b)

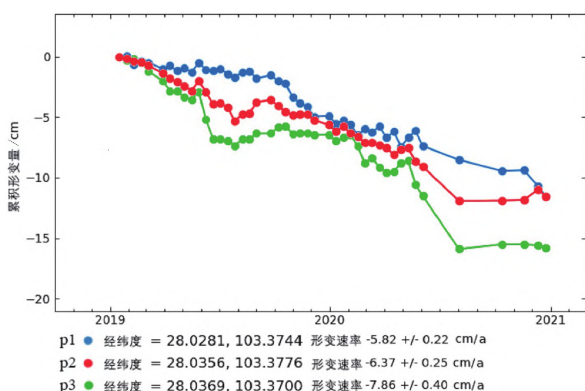


图6 建设村滑坡3处特征点地表形变时间序列变化曲线图

31降轨影像LOS方向形变速率图(图5),叠置在该滑坡的影像上可观察到,滑坡形变区域即为滑坡体边界,滑坡体整体处于拉张变形阶段,后缘形变速率小,中部和前缘形变速率大。

选取滑坡体后缘、中部、前缘3处特征点以进一步研究滑坡体典型点位时间序列形变量特征,研究两年的形变量时间序列累积曲线特征(图6),点号分别为p1、p2、p3,形变速率分别为-5.82 cm/a、-6.37 cm/a和-7.86 cm/a,3处特征点均为过滤挑选后得出,点处均发育第四系残坡积碎石土,出露强风化的奥陶系—志留系砂岩、粉砂岩。在该时间内,3个特征点均呈现出下沉趋势,其中p3较p1、p2点累积形变量最大,达-15cm。2019年5—10月,滑坡中部和前缘的形变速率较后缘明显加快,出现分化趋势,并在汛期结束时速率放缓并重新与后缘同步;同样在2020年,该滑坡前缘和中部仍处于加速变形阶段,平均形变速率达-28.35 cm/a和-24.02 cm/a,后缘部位仍匀速下沉。

综合分析表明,该滑坡前缘受江水的浸泡、侧蚀和冲刷作用较强,属于牵引式滑坡,结合学者研究该滑坡于2013年7月水库蓄水诱发,且截至2020年底,仍处于形变阶段,属于活动滑坡,严重威胁滑坡体中部乡道、后缘建设村居民。

3.3.2 推移式滑坡

干海子滑坡位于距坝体河道里程13.4~14.3 km的金沙江右岸,永善县务基镇白胜村,是近坝库段的一个大型古滑坡,属于志留系软弱地层控制的切层基岩滑坡,其上的唐家湾坐落体堆积于后缘滑坡缓台上,前缘在金沙江水流作用下局部失稳形成垮堵湾(刘仕勇和李攀峰,2018)。滑坡体由角砾、岩屑夹泥组成,原岩为志留系泥页岩,下伏滑床基

岩为下志留统龙马溪组的泥页岩及粉砂岩,岸坡结构属于缓倾逆向斜坡(李秀珍等,2010)。滑坡长约900 m,宽700~900 m,上窄下宽,呈圈椅状,厚度约为55~166 m,体积约 $4760 \times 10^4 \text{ m}^3$ (邓宏艳和王成华,2011),该滑坡整体较平缓,坡度约 20° ,主滑方向为 325° 。国道213从滑坡区上部穿过。

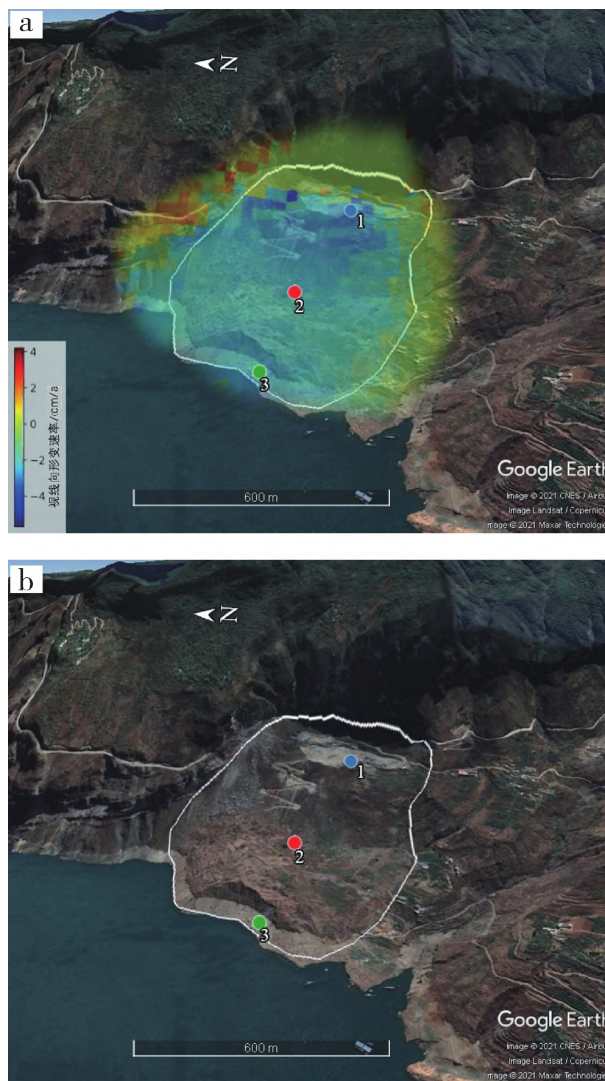


图7 干海子滑坡年均形变速率图(a)与遥感影像图(b)

研究截取了干海子滑坡2019-1-1—2020-12-31降轨影像LOS方向形变速率图(图7),叠置在该滑坡的影像上可观察到,滑坡区整体处于下沉状态,滑坡后缘和前缘形变速率较大,中部形变速率较小,滑坡区边界之外较稳定。

同样选取了滑坡体后缘、中部、前缘3处特征点,研究两年的形变量时间序列累积曲线特征(图8),点号分别为p1、p2、p3,形变速率分别为-3.77

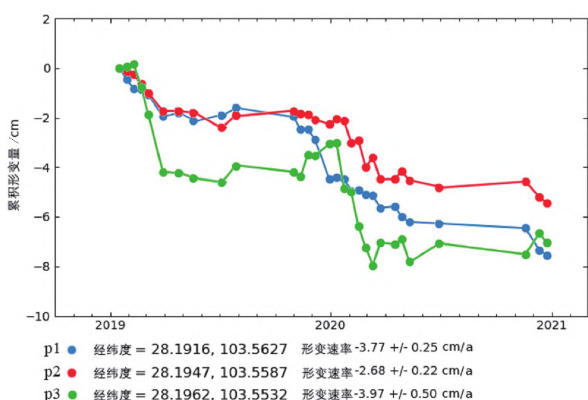


图8 干海子滑坡3处特征点地表形变时间序列变化曲线图

cm/a, -2.68 cm/a 和 -3.97 cm/a, 3处特征点均为过滤挑选后得出,特征点均位于基岩解体后形成的块碎石层滑坡体上,岩土体结合性差,稳定性较差。在观察期内,3个特征点均呈现出下沉趋势,其中p1和p3较p2点累积形变量最大。2019年11月—2020年4月,2020年11—12月,p1点和p2点下沉趋势相同,但后缘下沉速率较中部更快,在2019年11月之后两者速率出现分化并逐渐拉大。p3点与p1点和p2点变形趋势不同,在2019年1月,2019年11—12月和2020年12月期间,p3点出现小幅度的抬升趋势,并在抬升到一定程度后出现急速下沉,平均变形速率达30cm/y。

综合分析表明,滑坡后缘受到唐家湾座滑体的推挤,前缘受到挤压后出现轻微鼓胀,并在坡面下滑力超过抗滑力时,出现急速沉降,表现出推移式滑坡的特点。结合2019年之前多位学者对干海子滑坡的形变监测结果,表明该滑坡多年来一直处于蠕变变形阶段,威胁坡体上部国道和过往行人车辆的安全。

通过对3处典型滑坡在2019—2020年两年的形变特征分析,表明溪洛渡库区两岸活动滑坡受到金沙江的浸泡、侧蚀和冲刷作用较强,形变速率较大。根据多处特征点的时间序列形变曲线,预判未来这些活动滑坡仍将处于蠕变或加速变形阶段,位于这些活动滑坡附近和滑坡对岸的承灾体,存在不同程度的安全隐患,应当受到地方政府部门和当地居民的重视。

4 结论

(1)利用InSAR技术能快速有效识别滑坡隐患,综合利用SBAS-InSAR处理方法、时间序列InSAR

分析方法和光学信息提取方法能更好地掌握滑坡隐患的形变特点与发生模式。

(2)在溪洛渡库区,采用升、降轨SAR数据共探测出16处滑坡存在地表形变,其中采用升轨数据探测到11处,降轨数据探测到9处。表明综合使用升、降轨数据能完整探测地表形变信息。

(3)基于SAR数据监测及综合分析,溪洛渡库区滑坡隐患大部分以牵引类型为主,次为推移式,由于库区蓄水影响,水体对岸坡前缘的岩石产生显著的侵蚀作用,岸坡前缘稳定性变差,牵引滑坡体向下滑动,较推移式滑坡形变速率更快,形变量更大。

(4)根据时间序列形变分析,可以对活动滑坡变形趋势做出预判,为当地政府部门和居民防灾减灾作出指导。

注 释

- ① 马振福. 1987. 四川省金沙江(攀枝花—宜宾)1:10万河谷环境工程地质调查报告[R]. 绵阳:四川地矿局909水文地质工程地质大队。

参考文献

- Chen G, Zhang Y, Zeng R, Yang Z, Chen X, Zhao F, Meng X. 2018. Detection of land subsidence associated with land creation and rapid urbanization in the Chinese Loess Plateau using time series InSAR: A case study of Lanzhou New District[J]. Remote Sensing, 10(2): 270–286.
- Guo J M, Hu J Y, Li B, Zhou L, Wang W. 2017. Land subsidence in Tianjin for 2015 to 2016 revealed by the analysis of Sentinel-1A with SBAS-InSAR[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 11(2): 1–14.
- Rizo V, Tesauro M. 2000. SAR interferometry and field data of Randazzo landslide (Eastern Sicily, Italy) [J]. Physics & Chemistry of the Earth, 25(9): 771–780.
- Yun J Z, Fattahi H, Amelung F. 2019. Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction [J]. Computers & Geosciences, 133: 104331.
- 陈富龙, 林琤, 程世来. 2013. 星载雷达干涉测量及时间序列分析的原理、方法与应用[M]. 北京: 科学出版社.
- 代聪, 李为乐, 陆会燕, 杨帆, 许强, 简季. 2020. 甘肃省舟曲县城周边活动滑坡InSAR探测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 46(7): 994–1002.
- 邓宏艳, 王成华. 2011. 溪洛渡库区库岸老滑坡工程地质特征及成因机制分析[J]. 中国水土保持, (5): 59–62.
- 葛大庆, 王艳, 郭小方, 范景辉, 刘圣伟. 2008. 利用短基线差分干涉纹图集监测地表形变[J]. 大地测量与地球动力学, (2): 61–66.

- 李凌婧,姚鑫,张永双,王桂杰,郭长宝. 2015. 基于PS-InSAR 技术的断裂带近场变形特征提取[J]. 地质通报,34(1): 217-228.
- 李攀峰,黄啸鹰,吴建川,刘源. 2016. 溪洛渡水库运行期干海子滑坡变形动态响应研究[C]//中国地质学会工程地质专业委员会. 2016年全国工程地质学术年会论文集. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司,105-108.
- 李秀珍,王成华,邓宏艳. 2010. 灰色关联度法和距离判别分析法在溪洛渡库区潜在滑坡判识中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,21(4): 77-81.
- 刘秋强,胡嫚,吕杰堂,程凯. 2021. 地下水渗流作用下的三峡库区巴东县赵树岭滑坡稳定性研究[J]. 矿产勘查,12(7): 1647-1654.
- 刘仕勇,李攀峰. 2018. 溪洛渡库区典型滑坡堆积体变形与防灾探讨[J]. 地下空间与工程学报,14(5): 1393-1399.
- 刘星洪,姚鑫,周振凯,李凌婧,姚佳明. 2018. 滑坡灾害InSAR应急排查技术方法研究[J]. 地质力学学报,24(2): 229-237.
- 陆会燕,李为乐,许强,董秀军,代聪,王栋. 2019. 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),44(9): 1342-1354.
- 戚赏,刘磊,牡丹,吕灯. 2020. 河南丹江口库区滑坡危害性评价及防治对策[J]. 矿产勘查,11(3): 624-629.
- 赵超英,刘晓杰,张勤,彭建兵,许强. 2019. 甘肃黑方台黄土滑坡In-SAR 识别、监测与失稳模式研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),44(7): 996-1007.
- 张利芹,李浩,顾超,潘会彬,付鹏伟. 2020. 基于信息量法的重庆云阳县(三峡库区)地质灾害易发性评价[J]. 矿产勘查,11(12): 2809-2815.
- 张路,廖明生,董杰,许强,龚健雅. 2018. 基于时间序列InSAR 分析西部山区滑坡灾害隐患早期识别——以四川丹巴为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版),43(12): 286-296.
- 周围,沈习文. 2012. 溪洛渡水电站高路堤边坡稳定性分析与处置[J]. 山西建筑,38(25): 170-172.
- 朱吉龙. 2019. 溪洛渡库区滑坡地质灾害风险评价研究[D]. 成都: 西南石油大学.

欢迎订阅 2023 年《矿产勘查》(月刊)

《矿产勘查》创刊于1992年,是由中国有色金属工业协会主管,有色金属矿产地质调查中心主办,中国有色金属工业协会地质矿产分会、中国有色金属学会地质学术委员会、中国地质学会矿山地质专业委员会联合协办出版,为综合性技术类刊物。

《矿产勘查》收录情况:中国科技核心期刊、中国科技论文统计源期刊、中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊,日本科学技术振兴机构数据库(JST)收录期刊。

《矿产勘查》月刊,大16开本,每月28日出刊。每期(册)定价50元,全年定价600元,国内外公开发售。订阅方式:1.全国各地邮政局(所);2.联合征订;3.本刊编辑部。

中国标准连续出版物号:

ISSN 1674 - 7801
CN 11 - 5875/TD

国内邮发代号: 2 - 656

国内邮发代号: 2 - 656