

doi: 10.6046/zrzyyg.2023168

引用格式: 俞文轩, 李益敏, 计培琨, 等. 基于升降轨 SAR 数据的兰坪县黄登水电站上游时间序列地表形变研究[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(4): 282–294. (Yu W X, Li Y M, Ji P K, et al. Time series surface deformation of the upper reaches of Huangdeng hydropower station in Lanping County based on ascending and descending SAR data[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(4): 282–294.)

基于升降轨 SAR 数据的兰坪县黄登水电站上游时间序列地表形变研究

俞文轩¹, 李益敏², 计培琨², 冯显杰¹, 向倩英¹

(1. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500; 2. 云南大学地球科学学院, 昆明 650500)

摘要: 星载合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture Radar, InSAR)是目前被广泛应用于地表形变监测的一种具有全天时、全天候、高精度的大范围监测手段,但由于形变观测方法单一,在形变监测过程中不可避免地存在很大不确定性,进而产生误判。针对单次监测产生的不确定性,该文基于升降轨 SAR 数据集的短基线集时间序列 InSAR (small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR) 结果二维解算的技术,分析了 2020 年 4 月—2022 年 8 月黄登水电站上游地表形变情况。研究表明,使用 34 景 Sentinel-1 升轨数据和降轨数据,获取了黄登水电站上游的二维形变,识别出黄登水电站上游 6 处滑坡隐患点;发现研究区形变以水平向为主,其中车邑坪区域的二维形变速率最大,水平形变速率达到 158 mm/a,垂直形变速率达到 81 mm/a。此外,通过对澜沧江江岸距离、降雨量和时间序列形变进行相关性分析,得到了研究区二维形变的分布情况及其季节性变化特征。

关键词: SBAS; 时序 InSAR; 二维解算; 形变监测

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2024)04-0282-13

0 引言

水电作为一种清洁、可循环利用的资源受到了越来越多的关注^[1]。拥有“东南亚水塔”之称的中国云南^[2],是全球水电开发核心区之一。然而,水电站的建设会对当地的水文地质条件和区域重力场产生影响,可能导致地面形变和局部地质灾害^[3]。历史上已经发生过多起水电站建成导致的滑坡和灾害。1963 年意大利 Vajont 水库发生巨大的山体滑坡,造成约 2 000 人死亡^[4];三峡大坝作为目前世界上最大的水电站,自 2008 年来发生的滑坡次数激增^[5],学者们越来越关注水电建设带来的地表形变,以减少潜在的滑坡风险。

目前,滑坡产生的机理研究较成熟^[6],但预测滑坡发生的时间和地点仍然具有挑战性。对于滑坡的地形形变监测常用的手段包括:GPS 测量、实地

水准测量、现有遥感数据图像解译和伸缩计深部形变监测等方法,这些较为传统的测量方法人力物力成本较高且无法在极端天气、复杂地形进行监测,监测范围有限。而作为新兴的监测技术,合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture Radar, InSAR)可以很好地对传统测量方式上的局限加以补充。InSAR 使用的合成孔径雷达(synthetic aperture Radar, SAR)是一种主动式微波传感器,这种传感器具有不受天气的影响实现全天时、全天候对地观测的优势,是一种较为成熟且极具发展潜力的新型监测技术^[7],随着干涉图叠加 InSAR (stacking-InSAR),短基线集时间序列 InSAR (small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR) 和永久性散射体 InSAR (persistent scatterer InSAR, PS-InSAR) 等数据处理方法的提出^[8-10],InSAR 已经成为形变监测、滑坡识别的重要工具之一,国内外已有众多团队利用 InSAR 进行地质灾害监测并取得成果^[11-14],对于水电站的地表形变监测也有先例^[15-16],在众多 InSAR

收稿日期: 2023-06-09; 修订日期: 2023-09-05

基金项目: 云南省科技厅—云南大学联合基金重点项目“‘天空地’协同的高山峡谷区重大地质灾害隐患识别监测预警研究”(编号: 2019FY003017)、云南省中老孟缅自然资源遥感监测国际联合实验室和中国地质调查局项目“重要区域地质灾害监测评价与综合遥感地质调查”(编号: DD20221824)共同资助。

第一作者: 俞文轩(1999-),男,硕士研究生,研究方向为 InSAR 形变监测。Email: yuwenxuan202305@163.com。

通信作者: 李益敏(1965-),女,学士,研究员,研究方向为 3S 技术在生态安全、山地环境变化监测中的应用以及地质灾害评价、早期识别、监测预警研究。Email: liyimin1965@163.com。

的处理方法中,SBAS-InSAR 技术是使用最广泛的方法之一^[17-18],它利用干涉图网络,从中限制时间基线和空间基线,以减少几何去相关的影响^[19-21],SBAS-InSAR 技术所获取的形变速率分布在空间上相对更为连续^[22],受各种误差的影响更小^[23],对复杂地形进行的形变监测具有一定可靠性^[24]。考虑到研究区地形的复杂度,本文使用 SBAS-InSAR 开展地形形变监测。

InSAR 由于其侧视成像的原理的限制,单轨道 InSAR 所提供的视线向(line of sight, LOS)分析形变反映的滑坡运动十分有限,如果只使用单轨道的一维分量代替滑坡的运动趋势无疑会产生较大的误差,考虑到滑坡识别的准确率,融合多轨道、多角度的 LOS 向形变数据已十分必要^[25]。Zhu 等^[26]利用二维形变信息研究了贵州西部滑坡的运动模式;Meng 等^[27]利用垂直形变和水平形变对黄土滑坡进行分类;Chen 等^[28]使用多轨道 SAR 数据进行二维解算获得了溪洛渡水电站的形变和蓄水量的关系。目前的研究通过对多轨道 LOS 向形变的解算得到的二维形变,最大程度地监测出地表形变的東西向特征。

本文以云南省怒江傈僳族自治州兰坪县境内澜沧江干流的黄登水电站上游区域为研究区,选取 2020 年 4 月—2022 年 8 月的 34 景 Sentinel-1A 升轨影像和降轨影像进行时序分析,并通过对升降轨数据的二维解算识别该区域的水平形变和垂直形变,结合研究区距澜沧江距离、降雨量等特征,对滑坡隐患点进行分析预测。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

黄登水电站位于云南省怒江傈僳族自治州兰坪县境内的澜沧江干流上,地理坐标约为 E99°07'11", N26°33'35"。坝址距盘营镇公路约 14 km,距兰坪县约 70 km,水电站于 2010 年开始施工,2019 年建成并投产使用,总装机容量 1 900 MW,保证出力 515.52 MW,多年平均发电量为 85.78×10⁸ kW·h,以发电

为主,是兼有防洪、灌溉、供水和旅游等综合效益的大型水利水电工程,担任着“西电东送”、“云电外送”的任务,是云南省电力系统中的主力电站之一。

黄登水电站所在地区——澜沧江上游,属于高山峡谷地带,地势崎岖,具有低纬度山地季风和典型的三维气候垂直分布特征,雨季干湿分明。这种气候条件使降雨成为滑坡的强触发因素,导致水电站的可靠性下降,水库边坡稳定性下降^[29]。现有研究发现,库区上游存在大型岩石滑坡^[30],Wang 等^[31]对该研究区进行了安全评估,发现黄登水电站安全裕度较低,存在滑坡隐患,可见水电站上游的滑坡隐患已经不可忽视,对该地区的地形形变监测具有不可忽视的现实意义。

1.2 数据源

选取影像数据为黄登水电站上游区域 2020 年 4 月—2022 年 8 月期间的 34 景 Sentinel-1A 升轨和降轨的雷达影像(图 1),雷达图像的详细参数如表 1 所示。为了去除图像配准和差分干扰过程中卫星轨道存在的地形相位误差,本文采用 POD(precise orbit ephemerides)精轨数据进行轨道修正,美国地质调查局 30 m SRTM 数字高程模型(digital elevation model,DEM)数据用于去除地形噪声,美国国家气候数据中心的降雨量数据进行滑坡季节性运动特征分析。

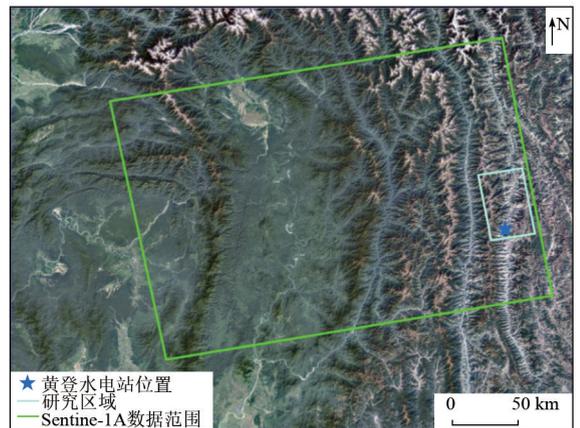


图 1 研究区的地理位置和 SAR 图像覆盖范围

Fig.1 Location of the study area and SAR image coverage area

表 1 研究中使用的雷达图像参数

Tab.1 Radar image parameters used in the study

数据源	波长/cm	轨道	入射角/(°)	影像数量/景	极化方式	时间跨度
Sentinel-1A SLC IW	5.55	升轨	39.27	34	VV	2020/05/06—2022/08/12
		降轨	39.46	34	VV	2020/04/26—2022/08/26

2 研究方法

本研究的技术路线如图 2 所示。通过 SBAS-InSAR 方法计算研究区升降轨年平均 LOS 向形变速率和时间序列形变。利用二维解算方程,对升降

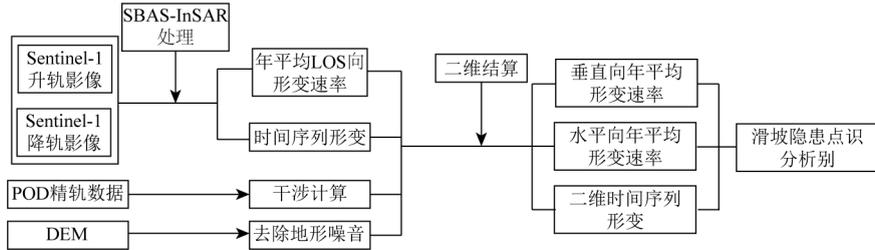


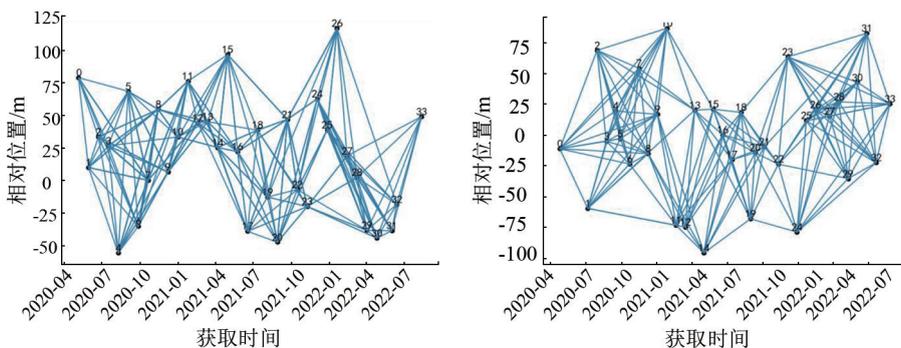
图 2 技术路线图

Fig.2 Flowchart of the proposed method

2.1 SBAS-InSAR 处理

采用 SBAS-InSAR 技术计算研究区 LOS 向年平均形变和时间序列形变。SBAS-InSAR 技术采用了多主影像,以过滤掉短时空基线干扰的组合,提取高相干点目标进行时间序列分析。同时,通过对原始的干涉相位展开并进行奇异值分解,得到点目标的时序形变和形变率。该方法可以有效地克服时空基线过长导致的去相关问题,降低大气相位延迟和

高程误差的影像^[32],计算步骤包括对获取的 SAR 影像进行预处理,即对升轨和降轨的 Sentinel-1 影像分别进行配准,本文通过 4×1 的多视因子增大干涉图的信噪比,之后进行干涉组合优化和微分干涉相位计算,其中最大时空基线分别设置为 180 d 和 180 m,共生成了 332 组干涉对,包括 160 组升轨和 172 组降轨(图 3)。



(a) SBAS-InSAR 升轨空间基线图

(b) SBAS-InSAR 降轨空间基线图

图 3 SBAS-InSAR 时空基线

Fig.3 SBAS-InSAR spatiotemporal baseline

获得干涉对后,对干涉对进行相位展开,并采用自适应滤波函数平滑干扰相位,采用最小费用流(minimum cost flow, MCF)算法进行相位展开,然后继续形变率反演,以去除大气误差和地形相位的影响,并选择高质量的分分布式散射体,通过奇异值分解(singular value decomposition, SVD)得到形变率和时间序列形变。

2.2 二维形变分解

通过升轨和降轨 SAR 数据的组合,可以有效地获取研究区垂直方向和东西方向的水平运动^[33],升降轨 SAR 影像经过 SBAS-InSAR 处理获得的形变量是地面点相对于 SAR LOS 向的形变,由于卫星飞

行方向接近南北方向,雷达 LOS 向垂直于卫星飞行方向,雷达对地表在南北方向的形变感知极其微弱,此处仅考虑东西方向的水平形变,当升轨和降轨位于同一时空时,二维形变速率和 LOS 向形变速率的关系为:

$$V_{asc} = V_v \cos \theta_{asc} - V_h \cos(2\pi - \alpha_{asc}) \sin \theta_{asc}, \quad (1)$$

$$V_{des} = V_v \cos \theta_{des} - V_h \cos(2\pi - \alpha_{des}) \sin \theta_{des}, \quad (2)$$

式中: V_{asc} 和 V_{des} 分别为升轨和降轨 LOS 向的形变速度; V_v 和 V_h 分别为垂直和东西向形变速率值; θ_{asc} 和 θ_{des} 分别为升轨和降轨的入射角(分别为 39.27° 和 39.46°); α_{asc} 和 α_{des} 分别为升轨和降轨的飞行方位

角。二维形变速率可以通过升降轨 LOS 向的形变
进行线性变换获得,原理如图 4 所示,其中 V_{real} 为实

际形变速率, β 为边坡滑动方向的方位角,计算公式
为:

$$V_h = \frac{V_{asc} \cos \theta_{des} - V_{des} \cos \theta_{asc}}{\cos(2\pi - \alpha_{des}) \sin \theta_{des} \cos \theta_{asc} - \cos(2\pi - \alpha_{asc}) \sin \theta_{asc} \cos \theta_{des}}, \quad (3)$$

$$V_v = \frac{V_{asc} + V_h \cos(2\pi - \alpha_{asc}) \sin \theta_{asc}}{\cos \theta_{asc}}。 \quad (4)$$

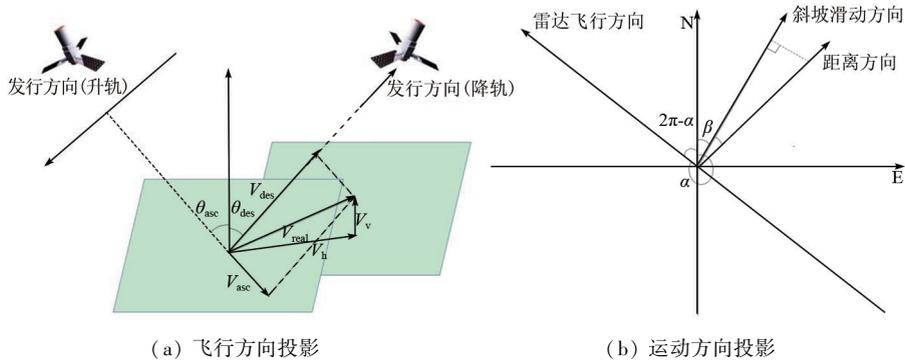


图 4 雷达飞行方向和地表运动方向投影的示意图

Fig.4 Schematic diagram of the projection of the radar flight direction and the surface movement direction

3 结果与分析

3.1 升轨和降轨数据沿 LOS 向的形变速率

升轨和降轨数据的 SBAS-InSAR 处理结果如图 5 所示。结果表明,研究区升、降轨在 LOS 向的年平均形变速率为 $-100 \sim 119 \text{ mm/a}$ 和 $-112 \sim 69 \text{ mm/a}$, 其中,负值表示远离传感器的形变速率,表现为地表沉降;正值表示朝向传感器的形变速率,表现为地

表抬升。在图 5 划定了 6 处强形变区域,其中升轨识别的强形变区域形变速率都为正值,表现为抬升;降轨识别的强形变区域形变速率都为负值,表现为沉降,升轨和降轨的监测结果相反,垂直方向的形变情况难以判断,可以认定该地区存在水平方向的形变,据此,需要对 SBAS-InSAR 的结果进行二维解算,以获取研究区在水平向和垂直向的形变速率情况。

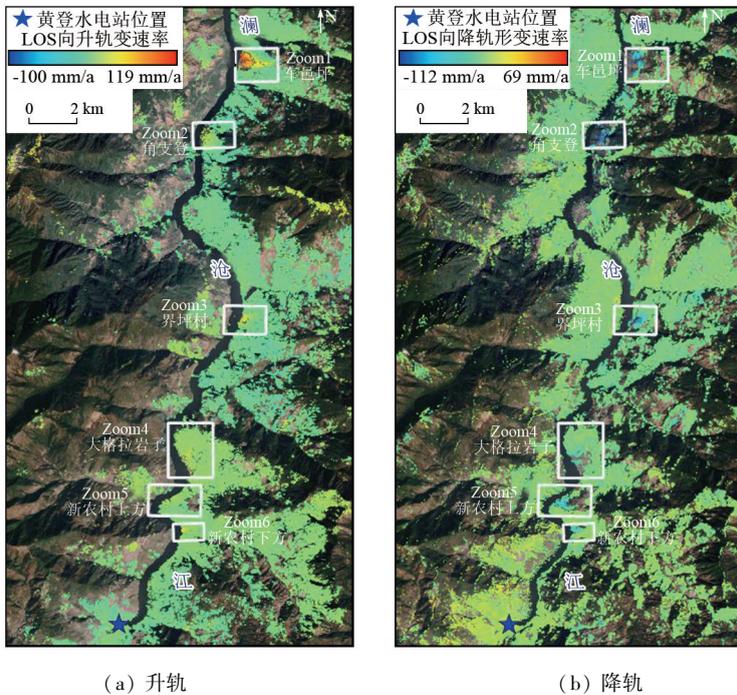


图 5 SBAS-InSAR 在 LOS 方向的监测结果

Fig.5 Monitoring results of SBAS-InSAR in LOS direction

3.2 基于时间配准的插值方法

在对 SAR 数据进行 SBAS-InSAR 处理之后,需对时间序列形变进行插值计算,以保证在进行二维解算处理时时间上的统一。采用了3种常见插值方法(线性插值、二次函数插值、三次样条插值),对所

选取的 POI(point of interest)形变量在时间维度上进行插值,以 P1(图5)的 LOS 向升轨和降轨的观测点为例,选取了升降轨共有的时间序列区间,对比分析3种插值方法的差异。

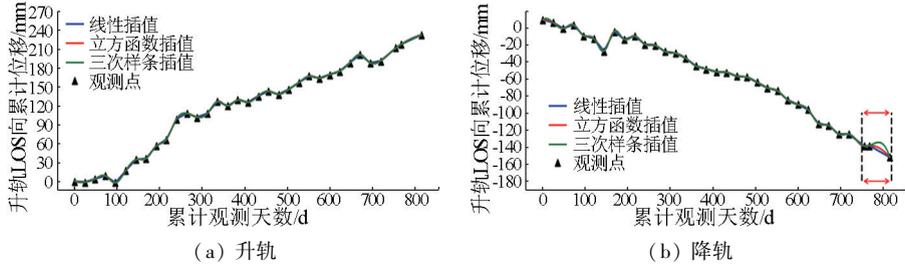


图6 3种插值方法对比

Fig.6 Comparison of three interpolation methods

从图6可以看出,3条插值曲线都较好地拟合了所有的观测点,且总体差异并不是很大,但在降轨LOS向观测日期为第768—816天的部分,三次样条插值函数曲线波动较大,2个观测点之间的斜率变化明显,这与地表的实际情况有所不同,在未受到外力影响的情况下不会发生较大的波动,而二次函数插值曲线较平滑,波动较小,整体更符合滑坡实际形变变化的情况,故在二维解算时,将采用二次函

数插值以解决升降轨数据在时间上的不统一问题。

3.3 二维形变率

利用二维形变解算公式对 SBAS-InSAR 的结果进行分解,得到了水平方向和垂直方向的形变速率结果,进而得到了水平方向和垂直方向的年平均形变速率,如图7所示。其中,水平方向和垂直方向的最大形变均位于车邑坪村区域(图5),需重点进行分析。车邑坪村的水平方向的最大形变速率为

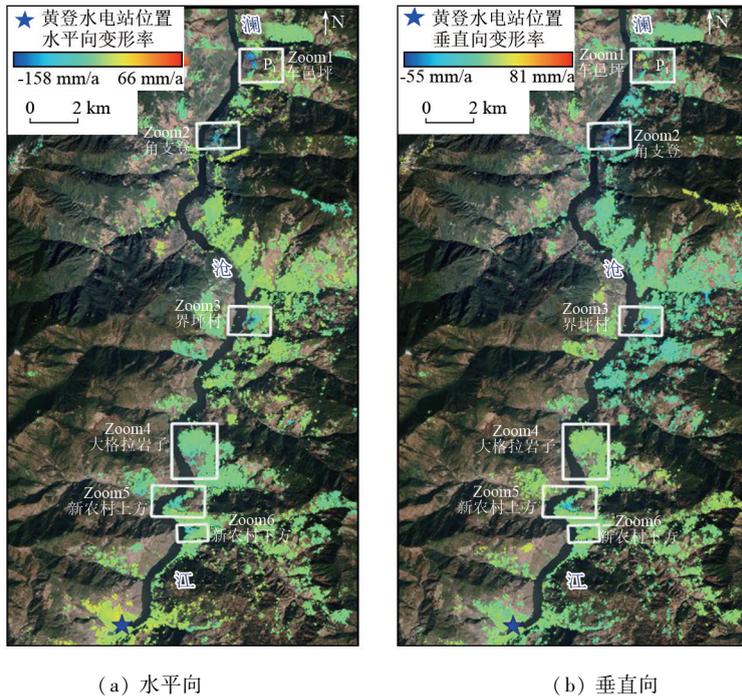


图7 水平向和垂直向的监测结果

Fig.7 Monitoring results in horizontal and vertical directions

-158 mm/a,表现为向东方向运动,负值表现为向西方向运动;垂直方向的最大形变速率为81 mm/a,正值表示抬升,负值表示沉降。

3.4 车邑坪村形变分析

车邑坪村位于兰坪县石登乡澜沧江边 Q20 县

道旁黄登水库沿江公路边,2021年1月,研究组在车邑坪村村民家看到明显形变裂缝(图8)。2022年6月,群测群防人员观察到车邑坪村中部地下水突然断流,库区水位下降15 m。可见水电站周边的安全隐患已经不可忽视。



图 8 车邑坪村村民房屋裂缝

Fig.8 Cracks in village houses at Cheyiping village

由于滑坡运动方向对卫星飞行方向的敏感性不同,降轨的形变程度略小于升轨,考虑到形变速率数据分布的情况,选取了垂直于岸向的剖面线 AB 以进行形变速率的分布情况分析(图 9(a)—(b))。从图 9(c)—(d)可以看出,该剖面的水平形变为负值,即朝西方向沿着滑坡向下运动,剖面的垂直形变为正值,表示抬升。从图 10 可以看出,A-B 剖面线在离岸边 70 m 左右达到峰值,平均水平形变速率达到 -87 mm/a ,平均垂直形变速率达到 71 mm/a ,二维形变速率在整体趋势上,距离澜沧江越近,形变速率越大。结合 LOS 向的监测结果可以看出,滑坡平面呈扇形,长约 1 500 m,宽约 800 m,最大水平形变速率、最大垂直形变速率均位于坡脚,且水平形变整体较大,此外,在车邑坪村区域内存在垂直方向的沉降,从结果可以看出,车邑坪村的滑坡比较危险,本文结合降雨量数据进行进一步分析。

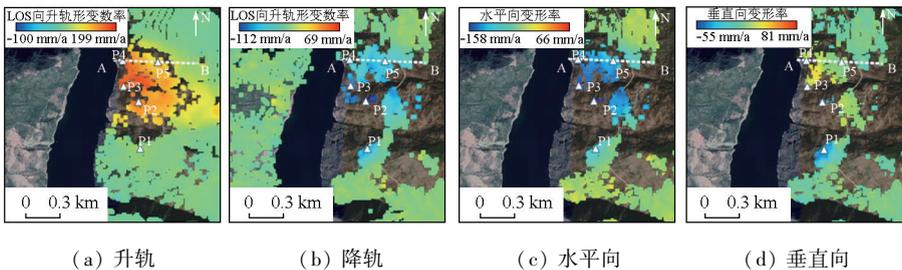


图 9 车邑坪村区域形变速率

Fig.9 Deformation rate of Cheyiping village area

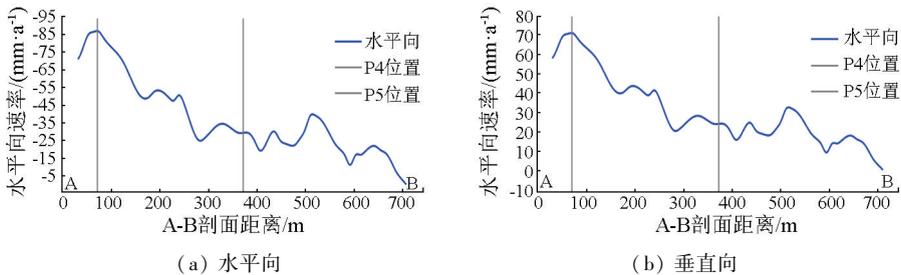


图 10 AB 剖面水平向和垂直向形变速率

Fig.10 Horizontal and vertical directions displacement rate of profile line A-B

4 讨论

4.1 车邑坪滑坡季节性运动特征

水是导致滑坡发生不可忽视的因素之一^[34],以往研究表明^[35-36],连续的降雨和澜沧江水位的快速变化会对车邑坪滑坡的形变速率产生影响,导致滑坡稳定性下降。将车邑坪滑坡的垂直和水平时间序列形变值与月降雨量数据进行对比分析,研究区雨季为 5—10 月,降雨量占全年 90% 以上。根据车邑坪强形变区各部分形变的特征,在图 9(a)中选定了点 P1, P2, P3, P4 和 P5 以讨论季节性降雨和滑坡形

变速率之间的相关性。其中点 P1 位于车邑坪村区域,点 P2, P3, P4 位于滑坡中下部,点 P5 位于滑坡顶部。

从图 11 可以看出,降雨量的变化对滑坡中下部的影响大于顶部的影响,其中滑坡中下部的点 P2, P3 和 P4 的累积水平形变曲线在雨季之后都有加速形变的趋势,在 2 个雨季之后,从图 11 中虚线和红线所划定的时间段(2020 年 9 月—2020 年 12 月和 2021 年 9 月—2021 年 12 月)可以看出,点 P2, P3 和 P4 所在区域累计形变曲线斜率发生了增大,形变加速,这段时间之外的时间段,形变速率趋于平缓。滑坡顶部的点 P5 的形变曲线斜率的变化小于

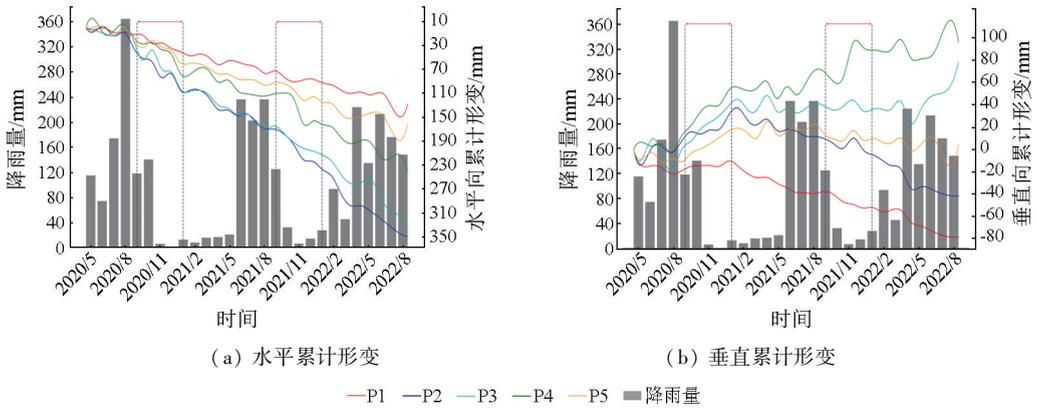


图 11 特征点的时间序列累计形变

Fig.11 Accumulated deformation time series of feature points

中下部的,且在垂直方向的累计变化更加平缓。滑坡在过去 2 a 发生了明显的滑动,其中形变最缓慢的点 P1 和 P5 的水平年平均形变速率也分别达到了 53 mm/a 和 68 mm/a,形变最剧烈的点 P2 的年平均形变更是达到了 158 mm/a。5 个点中,点 P1 的累计水平形变最小,但垂直形变最大且呈现抬升的趋势,在第二个雨季(2021 年 9 月—2021 年 12 月)后形变曲线斜率有明显的增大,于 2022 年 8 月累计抬升 95 mm。

在分析了 5 个点的形变曲线变化之后,可以发现雨季之后的 2 个月内,滑坡形变速率的曲线斜率更加陡峭,这表明滑坡形变速率增加。由于季节性降雨往往持续数月,其对滑坡形变具有较强的诱发作用。此外,这种加速的产生和消失通常会延迟

一段时间,因为降雨渗入滑坡岩体需要一定的时间,其对滑坡形变速率的影响具有滞后性^[37-38],这与很多研究的结果具有一致性^[39]。

4.2 其他 5 处滑坡

在黄登水电站上游,除了车邑坪滑坡外还存在其他 5 处滑坡隐患区域(图 7),分别位于支角登、界坪村、大格拉岩、新农村上方及其下方区域,这 5 处隐患区域均位于澜沧江右岸,本文选取了 5 个剖面,结合二维形变速率与降雨量、距澜沧江江岸距离的关系进行逐一分析。

4.2.1 支角登

支角登(图 12)滑坡隐患区域的水平向形变和垂直向形变都为负值,水平向表现为向西方向位移,垂直向表现为沉降,图 12(a)中标记的 2 个点 P6 和

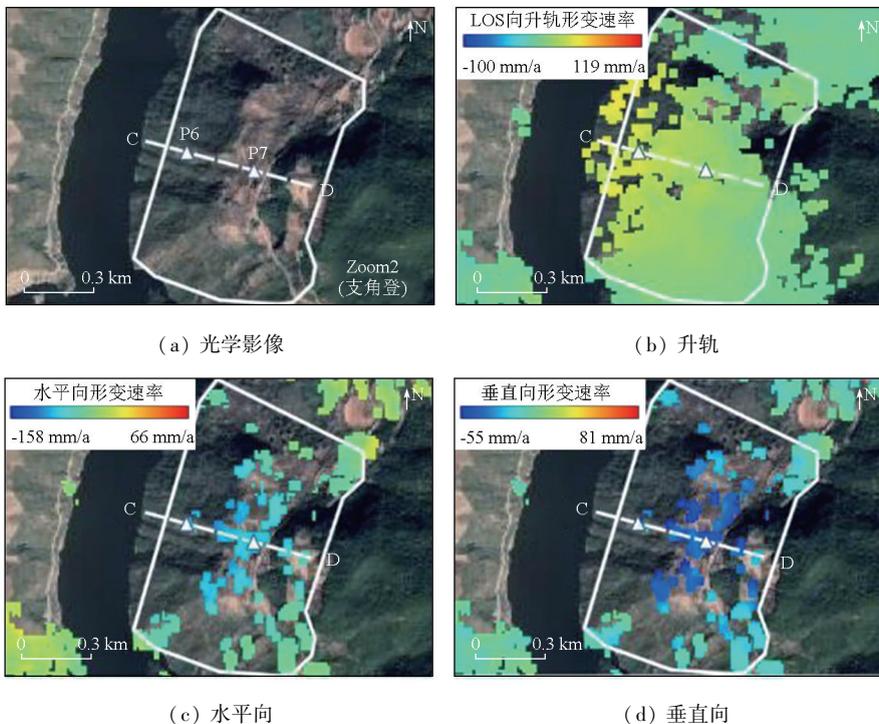


图 12-1 支角登区域

Fig.12-1 Zhijiaodeng area

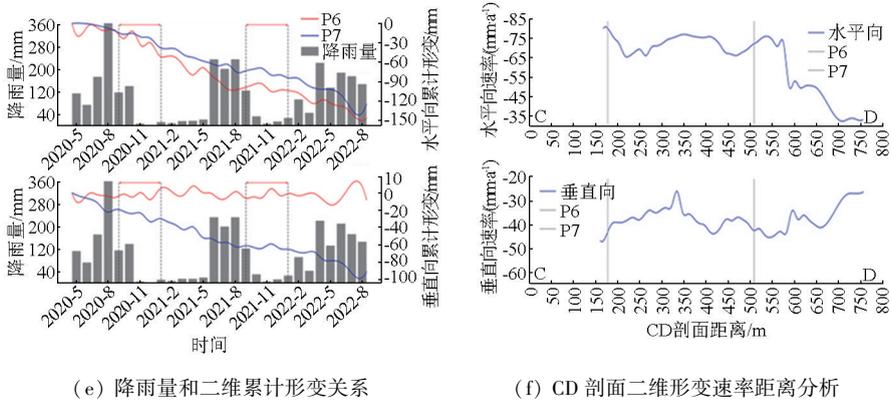


图 12-2 支角登区域

Fig.12-2 Zhijiaodeng area

P7 被选作形变特征分析,如图 12(e)所示,2 点的形变速率在雨季之后表现为先减小再增大,这种情况通常与地下水位的变化有关^[40],降雨对 2 点的形变速率无明显影响。通过 C-D 剖面的二维形变速率距澜沧江距离分析发现(图 12(f)),支角登异常形

变较大区域整体靠近江岸,整体垂直向形变分布较为均匀,水平形变大于垂直形变。

4.2.2 界坪村

界坪村(图 13)滑坡隐患区域的二维异常形变分布同支角登类似,整体水平形变速率大于垂直形

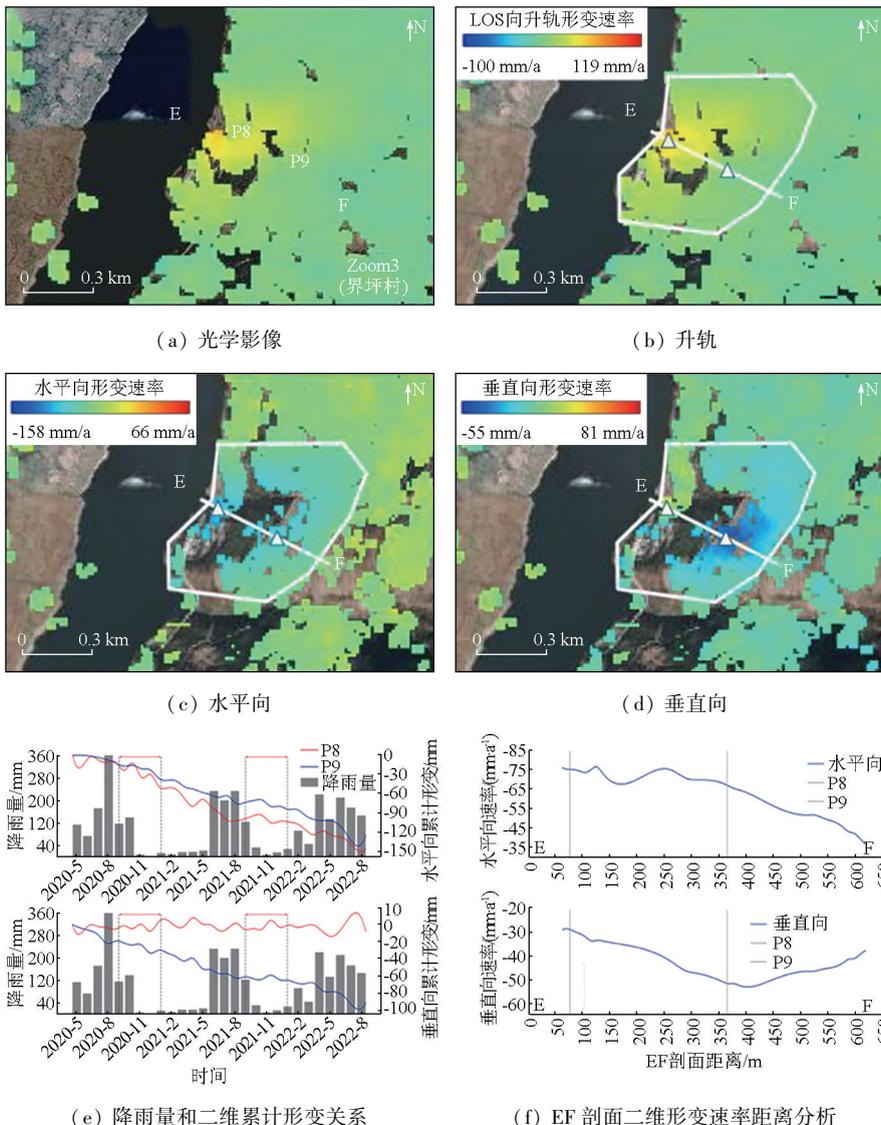


图 13 界坪村区域

Fig.13 Jieping village area

变速率,水平方向形变表现为向西方向移动,垂直方向以沉降为主。图 13(e)—(f) 可以看出,点 P9 在雨季之后二维形变具有加速的趋势,整体上水平形变距离江岸距离越近,速率越大,垂直速率无明显相关性。

4.2.3 大格拉岩子

大格拉岩子(图 14)滑坡隐患区域的形变以水

平向为主,表现为朝西方向运动,垂直向形变速率较水平向小,以沉降为主,且主要集中在隐患区域中下部靠近江岸的区域,图 14(e)—(f) 可以看出,点 P10 的累计水平形变曲线的斜率在雨季之后有明显的增加,水平形变在距离江岸 455 m 左右开始减小,垂直速率较小且无明显相关性。

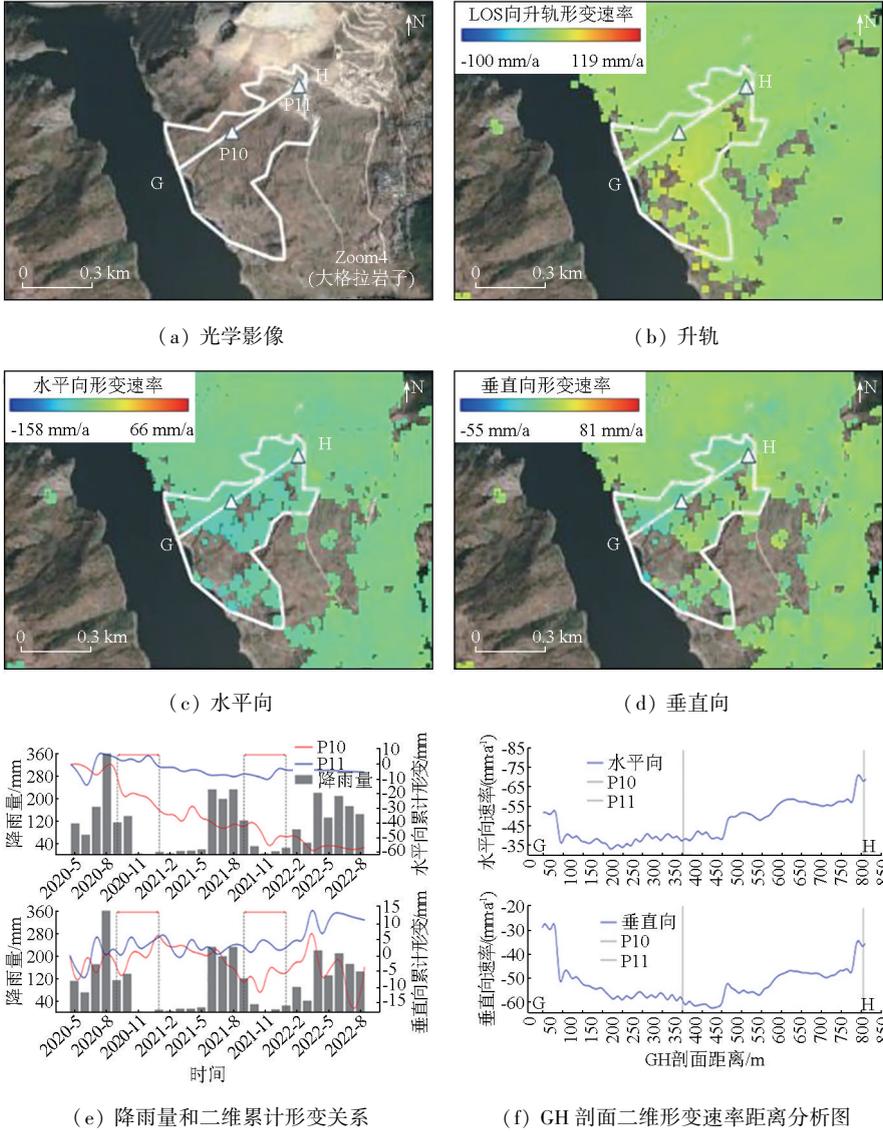


图 14 大格拉岩子区域

Fig.14 Dagela area

4.2.4 新农村

新农村(图 15—16)区域存在 2 处滑坡隐患区域,2 处异常形变区域的形变以水平方向为主,表现为朝西方向运动,垂直向形变速率较水平向较小,以沉降为主,形变主要集中在中下部,图 15(e)—(f) 和图 16(e)—(f) 可以看出,水平向形变速率在降雨之后增大,整体上呈现离澜沧江越近水平形变速率越大的趋势,垂直向无明显相关性。

4.3 研究区滑坡隐患区域形变特征

通过分析可以发现,研究区所有的异常形变点都在澜沧江右岸,总体形变以水平方向为主,都表现为向西,即澜沧江方向进行运动,并伴有以沉降为主的垂直向形变。水平方向形变整体上呈现出:距离澜沧江越近,形变速率越大的特征,垂直向形变与澜沧江距离相关性在车邑坪滑坡以外的区域并不明显。在雨季过后,形变最大的车邑坪滑坡二维形变

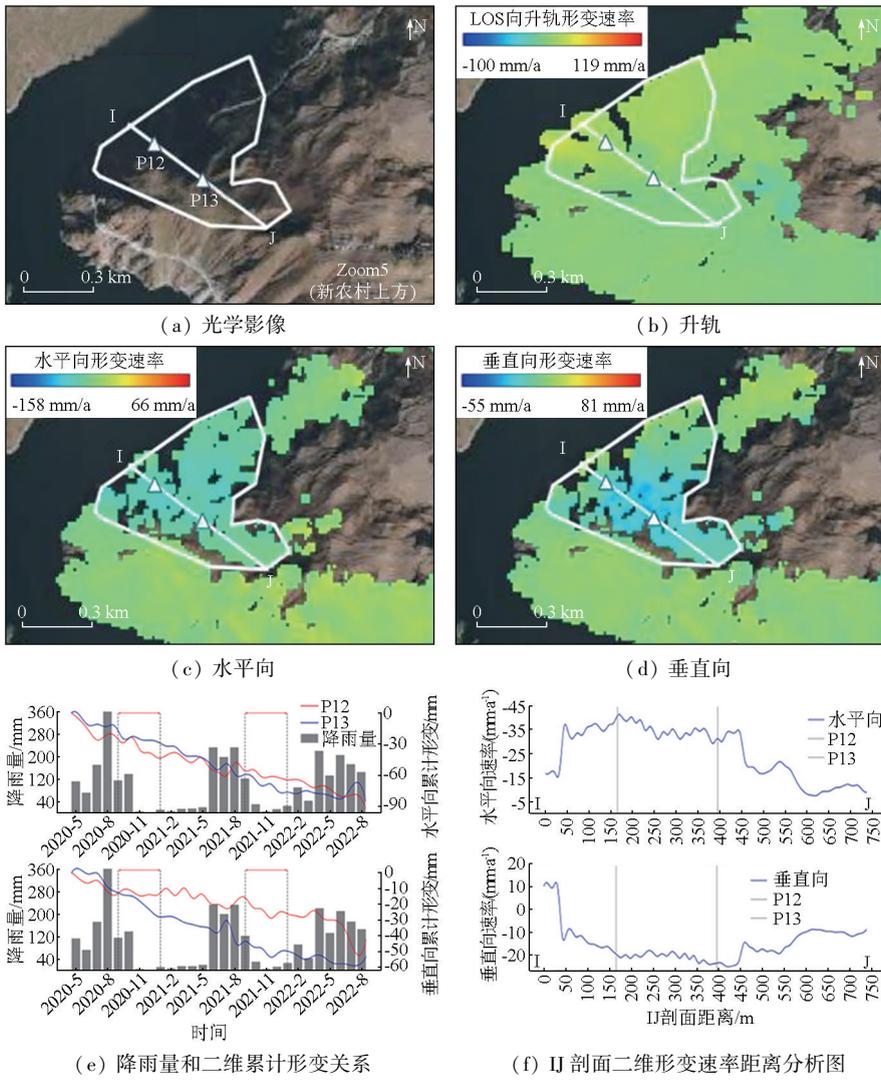


图 15 新农村上方区域
Fig.15 Upper area of Xinnong village

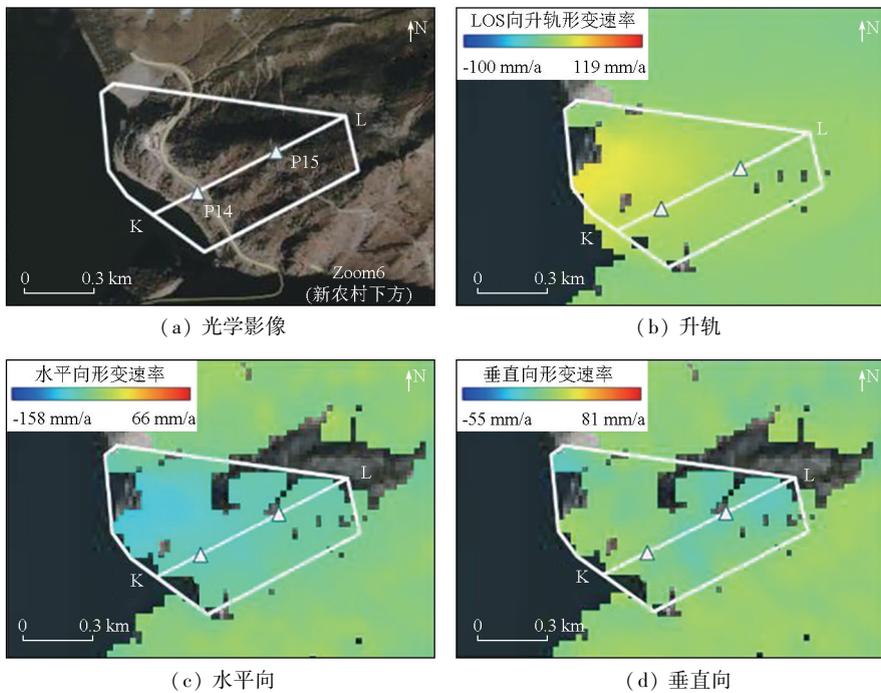


图 16-1 新农村下方区域
Fig.16-1 Lower area of Xinnong village

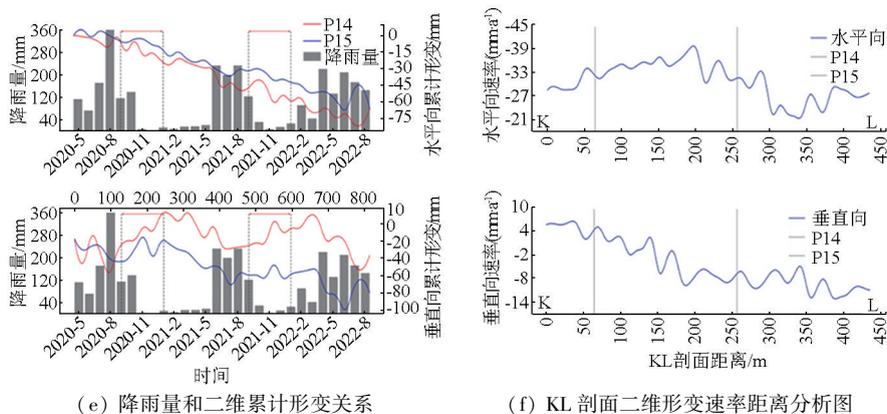


图 16-2 新农村下方区域

Fig.16-2 Lower area of Xinnong village

速率出现较为明显的增加,在其他滑坡隐患区域,降雨量和二维形变速率的相关性并不显著,仅在界坪村、大格拉岩子和新农村的部分区域表现出较好的相关性,水平形变的相关性比垂直形变更显著。

此外,经过二维解算所识别出的异常形变区域在 LOS 向的升轨和降轨的监测结果中都可以识别出来,但获得的监测结果却出现了 2 种相反的监测结果。所以,仅依靠 LOS 向的监测结果难以把握滑坡的走向和趋势,这也体现了对多轨道数据集结合进行二维解算的必要性。

5 结论

本研究利用升降轨 Sentinel-1A 卫星影像和时序 InSAR 技术对黄登水电站上游在 2020 年 4 月—2022 年 8 月期间的形变进行了大范围地表形变监测,结论如下:

1) 针对单一数据源获得的监测结果精度有限,多数据源时空不同步的问题,通过二维形变解算成功获取了整个时间序列的二维形变地表形变数据,识别了黄登水电站上游 6 处异常形变区域,通过数据分析发现,最大平均形变速率发生在车邑坪区域,最大水平形变速率达到了 158 mm/a,最大垂直速率为 81 mm/a,结果显示黄登水电站上游地表形变以水平形变为主,同时伴有垂直方向形变。

2) 通过分析二维形变和澜沧江江岸距离的关系发现,形变最大的车邑坪滑坡二维形变速率和江岸距离呈反比,形变速率伴随着江岸距离的增加而减小,车邑坪以外的异常形变区域,异常形变总是分布在澜沧江江岸,江岸距离和水平向形变的相关性更强,和垂直向相关性较弱。

3) 通过分析二维形变和降雨量的关系发现,形变最大的车邑坪滑坡二维形变速率存在季节性变化,在雨季后的 2 个月内加速,在其他滑坡隐患区

域,降雨量的和二维形变速率的相关性并不显著,仅在界坪村、大格拉岩子、新农村的部分区域表现出较好的相关性,且水平形变的相关性比垂直形变更显著。

本文的不足之处在于:进行二维解算时忽略了南北向水平的形变,仅考虑了东西向水平形变的结果,且没有考虑地下水水位的影响。在后续分析中,为了更全面地了解研究区地表形变的情况,可以增加 GNSS 数据以获取三维形变数据,并结合地下水水位数据进行进一步的分析。

参考文献 (References):

- [1] Bartle A. Hydropower potential and development activities [J]. Energy Policy, 2002, 30(14): 1231-1239.
- [2] Hennig T, Wang W, Feng Y, et al. Review of Yunnan's hydropower development. Comparing small and large hydropower projects regarding their environmental implications and socio-economic consequences [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 27: 585-595.
- [3] Wang L, Chen C, Zou R, et al. Surface gravity and deformation effects of water storage changes in China's Three Gorges Reservoir constrained by modeled results and in situ measurements [J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 108: 25-34.
- [4] Bosa S, Petti M. Shallow water numerical model of the wave generated by the Vajont landslide [J]. Environmental Modelling and Software, 2011, 26(4): 406-418.
- [5] Zhang L, Liao M, Balz T, et al. Monitoring landslide activities in the three gorges area with multi-frequency satellite SAR data sets [M] // Modern Technologies for Landslide Monitoring and Prediction. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015: 181-208.
- [6] Froude M J, Petley D N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016 [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018, 18(8): 2161-2181.
- [7] 云 烨, 吕孝雷, 付希凯, 等. 星载 InSAR 技术在地质灾害监测领域的应用 [J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 73-85.

Yun Y, Lyu X L, Fu X K, et al. Application of spaceborne interferometric synthetic aperture radar to geohazard monitoring [J]. Journal

- of Radars, 2020, 9(1): 73-85.
- [8] Sandwell D T, Price E J. Phase gradient approach to stacking interferograms [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B12): 30183-30204.
- [9] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Analysis of permanent scatterers in SAR interferometry [C]//IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No. 00CH37120). Honolulu, HI, USA. IEEE, 2002: 761-763.
- [10] 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.
- [11] 杨帆, 巩世彬, 陈梓萌. 时序 InSAR 技术对大连主城区沉降分析 [J]. *测绘工程*, 2022, 31(3): 61-67.
Yang F, Gong S B, Chen Z M. Time series InSAR technology for settlement analysis of Dalian main urban area [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2022, 31(3): 61-67.
- [12] 虎小强, 杨树文, 闫恒, 等. 基于时序 InSAR 的新疆阿希矿区地表形变监测与分析 [J]. *自然资源遥感*, 2023, 35(1): 171-179. doi: 10.6046/zrzyyg.2021415.
Hu X Q, Yang S W, Yan H, et al. Time-series InSAR-based monitoring and analysis of surface deformation in the Axi mining area, Xinjiang [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2023, 35(1): 171-179. doi: 10.6046/zrzyyg.2021415.
- [13] 向淇文, 郭金城, 汪娟, 等. 时序 InSAR 在贵州区域地质灾害隐患识别的应用 [J]. *测绘科学*, 2022, 47(9): 112-119.
Xiang Q W, Guo J C, Wang J, et al. Application of time series InSAR in recognition of hidden dangers of geological hazards in Guizhou area [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2022, 47(9): 112-119.
- [14] 张亚迪, 李煜东, 董杰, 等. 时序 InSAR 技术探测芒康地区滑坡灾害隐患 [J]. *遥感学报*, 2019, 23(5): 987-996.
Zhang Y D, Li Y D, Dong J, et al. Landslide hazard detection in Markam with time-series InSAR analyses [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(5): 987-996.
- [15] Liu P, Li Z, Hoey T, et al. Using advanced InSAR time series techniques to monitor landslide movements in Badong of the Three Gorges region, China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21: 253-264.
- [16] Zhao C Y, Kang Y, Zhang Q, et al. Landslide detection and monitoring with insar technique over upper reaches of Jinsha River, China [C]//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing, China. IEEE, 2016: 2881-2884.
- [17] Samsonov S, Dille A, Dewitte O, et al. Satellite interferometry for mapping surface deformation time series in one, two and three dimensions: A new method illustrated on a slow-moving landslide [J]. *Engineering Geology*, 2020, 266: 105471.
- [18] Maghsoudi Y, van der Meer F, Hecker C, et al. Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 64: 386-396.
- [19] Chen Y, Yu S, Tao Q, et al. Accuracy verification and correction of D-InSAR and SBAS-InSAR in monitoring mining surface subsidence [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(21): 4365.
- [20] Umarhadi D A, Avtar R, Widyatmanti W, et al. Use of multifrequency (C-band and L-band) SAR data to monitor peat subsidence based on time-series SBAS InSAR technique [J]. *Land Degradation and Development*, 2021, 32(16): 4779-4794.
- [21] Tao Q, Wang F, Guo Z, et al. Accuracy verification and evaluation of small baseline subset (SBAS) interferometric synthetic aperture radar (InSAR) for monitoring mining subsidence [J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2021, 54(1): 642-663.
- [22] Zhang P, Guo Z, Guo S, et al. Land subsidence monitoring method in regions of variable radar reflection characteristics by integrating PS-InSAR and SBAS-InSAR techniques [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(14): 3265.
- [23] Shanker P, Casu F, Zebker H A, et al. Comparison of persistent scatterers and small baseline time-series InSAR results: A case study of the San Francisco bay area [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(4): 592-596.
- [24] Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-González M, et al. Persistent scatterer interferometry: A review [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 115: 78-89.
- [25] Hu J, Li Z W, Ding X L, et al. Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 133: 1-17.
- [26] Zhu Y F, Yao X, Yao C, et al. Integration of vertical and horizontal deformation derived by SAR observation for identifying landslide motion patterns in a basaltic weathered crust region of Guizhou, China [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(16): 4014.
- [27] Meng Q, Confuorto P, Peng Y, et al. Regional recognition and classification of active loess landslides using two-dimensional deformation derived from sentinel-1 interferometric radar data [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(10): 1541.
- [28] Chen Q, Zhang H, Xu B, et al. Accessing the time-series two-dimensional displacements around a reservoir using multi-orbit SAR datasets: A case study of xiluodu hydropower station [J]. *Remote Sensing*, 2022, 15(1): 168.
- [29] Ning Y, Tang H, Zhang G, et al. A complex rockslide developed from a deep-seated toppling failure in the upper Lancang River, Southwest China [J]. *Engineering Geology*, 2021, 293: 106329.
- [30] Zhong R, Zhao T, He Y, et al. Hydropower change of the water tower of Asia in 21st century: A case of the Lancang River hydropower base, upper Mekong [J]. *Energy*, 2019, 179: 685-696.
- [31] Wang H L, Zhao X F, Chen H J, et al. Evaluation of toppling rock slopes using a composite cloud model with DEMATEL-CRITIC method [J]. *Water Science and Engineering*, 2023, 16(3): 280-288.
- [32] Lanari R, Mora O, Manunta M, et al. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(7): 1377-1386.
- [33] Fobert M A, Singhroy V, Spray J G. InSAR monitoring of landslide activity in Dominica [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 815.
- [34] Fuhrmann T, Garthwaite M C. Resolving three-dimensional surface motion with InSAR: Constraints from multi-geometry data fusion [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): 241.
- [35] Wang H, Sun P, Zhang S, et al. Rainfall-induced landslide in loess

- area, Northwest China: A case study of the Changhe landslide on September 14, 2019, in Gansu Province [J]. *Landslides*, 2020, 17(9): 2145–2160.
- [36] Guo C, Ma G, Xiao H, et al. Displacement back analysis of reservoir landslide based on multi-source monitoring data: A case study of the cheyiping landslide in the Lancang River Basin, China [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(11): 2683.
- [37] Xia M, Ren G M, Ma X L. Deformation and mechanism of landslide influenced by the effects of reservoir water and rainfall, Three Gorges, China [J]. *Natural Hazards*, 2013, 68(2): 467–482.
- [38] Li D, Yin K, Leo C. Analysis of Baishuihe landslide influenced by the effects of reservoir water and rainfall [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(4): 677–687.
- [39] Ma S, Qiu H, Hu S, et al. Characteristics and geomorphology change detection analysis of the Jiangdingya landslide on July 12, 2018, China [J]. *Landslides*, 2021, 18(1): 383–396.
- [40] Cohen-Waeber J, Bürgmann R, Chaussard E, et al. Spatiotemporal patterns of precipitation-modulated landslide deformation from independent component analysis of InSAR time series [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(4): 1878–1887.

Time series surface deformation of the upper reaches of Huangdeng hydropower station in Lanping County based on ascending and descending SAR data

YU Wenxuan¹, LI Yimin², JI Peikun², FENG Xianjie¹, XIANG Qianying¹

(1. *Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China;*

2. *College of Earth Science, Yunnan University, Kunming 650500, China*)

Abstract: The interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technique is widely applied to surface deformation monitoring, providing all-weather, all-time, and high-precision measurements over large areas. However, due to the limitations of the single deformation observation method, significant uncertainties inevitably arise during the monitoring process, leading to potential misinterpretations. Using the SBAS-InSAR (small baseline subset) two-dimensional solution technique based on ascending and descending SAR data, this study analyzed the surface deformations of the upper reaches of the Huangdeng Hydropower Station from April 2020 to August 2022. A total of 34 scenes of ascending and descending data from the Sentinel-1 satellite were used to derive the two-dimensional deformations of the upper reaches, with six potential landslide hazard sites there being identified. The results indicate that the study area displayed a predominance of horizontal surface deformations, with the highest two-dimensional deformation rates of up to 158 mm/a horizontally and 81 mm/a vertically observed in the Cheyiping area. Additionally, by correlation analysis between the distance from the Lancang River bank, rainfall, and the time-series deformations, this study identified the distribution of two-dimensional deformations in the upper reaches and its seasonal variations.

Keywords: SBAS; time series InSAR; two-dimensional analysis; deformation monitoring

(责任编辑: 陈昊旻)