

文章编号:1671-4229(2024)06-0017-09

【遥感技术与应用专题】

专题主持人:杨现坤

基于时序 InSAR 的宋家屋场滑坡 形变监测和孕灾因子分析

杜亚男, 师延泽, 俞文熙, 钟景文, 倪明璇
(广州大学 地理科学与遥感学院, 广东 广州 510006)

摘要: 三峡库区是我国滑坡发生的重灾区, 大坝蓄水排洪加速了长江及其支流沿岸边坡活动, 使得大量古滑坡被重新激活。宋家屋场滑坡发生于巴东县东渡口镇, 文章通过收集 2020 年 4 月至 2021 年 9 月的 15 景 ALOS-2/PALSAR-2 影像来获取该滑坡的时序形变, 并根据地层分布和滑移形态进行区域划分, 着重分析滑移特征和成因。此外, 通过统计稳定区域信息验证了形变结果的可靠性。结果表明: ①宋家屋场滑坡监测期间呈现“上段-中段-下段”台阶式滑移, 且偏向右侧发育, 最大形变出现在中段右侧, 速率达到 -193.9 mm/yr; ②通过剖面线和特征点提取, 进一步解释滑坡形变的时空形态, 发现阶梯式滑移与地层分布具有一致性; ③利用 Pearson 相关性检验, 认为滑坡整体滑移速率受到累积降水量和水位变化的共同影响。

关键词: 宋家屋场滑坡; 时序 InSAR; 形变监测; 三峡库区

中图分类号: TN958 文献标志码: A

Landslide monitoring and predisposing factor analysis of Songjiawuchang landslide based on MintPy time-series InSAR technique

DU Ya-nan, SHI Yan-ze, YU Wen-xi, ZHONG Jing-wen, NI Ming-xuan
(School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The Three Gorges Reservoir area is the hardest-hit area for landslide occurrence in China, and the dam's water storage and flood discharge accelerated the slope activities along the Yangtze River and its tributaries, reactivating a large number of ancient landslides. The Songjiawuchang landslide occurred in Dongdukou Town, Badong County. In this paper, the time-series deformation of this landslide was obtained by collecting 15 views of ALOS-2/PALSAR-2 images from April 2020 to September 2021, and the area was divided according to the stratigraphic distribution and the slip pattern, with an emphasis on analysing the characteristics and causes of the slip. In addition, the reliability of the deformation results was verified by statistical stability region information. The results show that: ① During the monitoring period, the Songjiawuchang landslide showed an 'upper section-middle section-lower section' stepped slip, with a bias towards the right side, and the largest deformation appeared in the right side of the middle section (Q2R), with a rate of -193.9 mm/yr. ② Through the extraction of the profile lines and feature points, the temporal and spatial morphology of the landslide deformation was further explained, and it was found that the stepped slip was consistent with the stratigraphic

收稿日期: 2024-08-23; 修回日期: 2024-09-24

基金项目: 广州市基础研究科技计划资助项目(2023A04J1542); 日本宇航局(JAXA)数据资助项目(ER2A2N018)

作者简介: 杜亚男(1988—), 女, 副教授、硕士生导师. E-mail: yndu@gzhu.edu.cn

引文格式: 杜亚男, 师延泽, 俞文熙, 等. 基于时序 InSAR 的宋家屋场滑坡形变监测和孕灾因子分析[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2024, 23(6): 17-25.

distribution; ③ Using the Pearson correlation test, it is concluded that the overall slip rate of the landslide is jointly affected by the cumulative precipitation and water level changes.

Key words: Songjiawuchang landslide; MT-InSAR; deformation monitoring; Three Gorges Reservoir area

三峡水库是中国重要的战略性淡水资源库,其在防洪、发电、航运和水资源综合利用等方面发挥着巨大作用。三峡库区地处我国地势的第二阶梯东缘,地质环境脆弱,是我国滑坡灾害的多发地区,水库蓄水和水位变化对库岸边坡的稳定性产生影响。滑坡监测是分析滑坡稳定性和危害性的重要手段之一,能为三峡库区的防灾减灾提供必要的信息支撑。

常用的滑坡监测手段主要包括传统监测和基于遥感技术的监测两类^[1]。传统滑坡变形监测主要有仪器布设(包括张力计、测斜仪、应变仪和压力计等)、水准测量以及全球导航卫星系统 GNSS (Global Navigation Satellite System, GNSS) 监测等技术。虽然这些技术能够获取单点上精确的形变信息,但其施测成本高,覆盖范围窄。随着遥感技术的不断发展,基于影像的大地测量技术已成功应用于滑坡监测,例如光学偏移量追踪(Optical Image Offset Tracking Technology)^[2]、星载合成孔径雷达干涉测量(Interferometrics Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术^[3]。

InSAR 技术因其全天候、全天时、大范围等优势,已在地表形变监测中得到广泛应用,尤其适用于三峡库区这样多云多雨的地区^[4]。然而,InSAR 的形变监测精度受到时空失相关、大气等因素的影响。为了克服相关影响,学者先后提出了差分干涉测量(D-InSAR)、时序干涉测量(MT-InSAR)和分布式时序干涉测量(DS-InSAR)等技术。这其中,MT-InSAR 依靠其毫米级形变监测精度和大覆盖等特点已成功应用在地表形变^[5]、滑坡^[6]、火山^[7]、地震^[8]等地质灾害监测中。具体到三峡库区的滑坡监测应用中,已有大量研究人员在大坝蓄水期间对三峡库区的典型单体滑坡进行了长时序的形变监测,如树坪滑坡^[9-12]、新铺滑坡^[13-14]、黄土坡滑坡^[15-16],并结合实地勘测数据,揭示了重点滑坡的滑移模式和形变趋势。除了单体滑坡的监测,也有学者开展了库区大范围滑坡识别^[17]的工作,这有利于发现潜在的新滑坡。这其中,宋家屋场滑坡便是通过广域滑坡监测而发现的被重新激活的古滑坡之一。目前,针对该滑坡的研究

限于对形变速率进行初步反演^[18],或停留于滑坡特定特征点目标的分析研究^[19],缺乏对滑坡时空形变特征和孕灾因子的深入剖析。与此同时,现有的免费开源的 C 波段哨兵数据在库区两岸植被覆盖密度高的区域会面临严重失相关的影响,从而影响形变的覆盖范围。

基于此,本文通过收集覆盖宋家屋场滑坡 2020 年 4 月至 2021 年 9 月的 15 景 L 波段 ALOS-2/PALSAR-2 数据,采用 MintPy 时序 InSAR 技术获取宋家屋场滑坡的时序形变。通过分析形变时空特征来获取该滑坡的孕育过程,结合水文地质条件来探讨滑坡背后的孕灾因子,为滑坡今后的防灾减灾工作起到一定的指导作用。

1 研究区域及方法

1.1 研究区概况

宋家屋场滑坡是一古滑坡,资料显示^[19-20]:宋家屋场滑坡区分布的地质地层为三叠系中统巴东组二组(T_2b^2)、三组(T_2b^3)和四组(T_2b^4)(图 1),该滑坡位于三峡上游约 61 km 的长江北岸,行政隶属巴东县东渡口镇绿竹筏村(图 2),坡顶高程约 462 m,坡底浸入江面,垂直高差超过 300 m。滑坡左、右两侧均为冲沟,坡顶位置有稀疏居民点和乡道,坡底附近河岸分布有小型船舶停靠点。

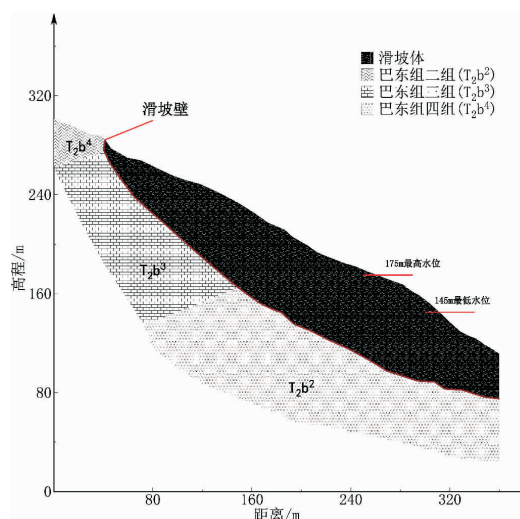


图 1 宋家屋场滑坡地层结构剖面

Fig. 1 Stratigraphic structure of Songjiawuchang landslide

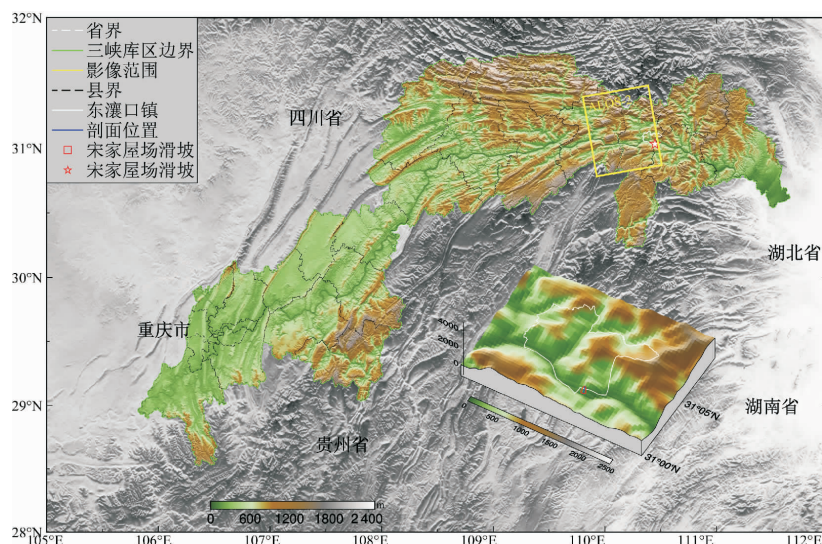


图2 宋家屋场滑坡地理位置

Fig. 2 Geographic location of the Songjiawuchang landslide

1.2 数据来源

1.2.1 SAR 卫星数据

本文收集了日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)自2020年4月到2021年9月获取的15景ALOS-2/PALSAR-2影像,参数信息和时空基线分别如表1和图3所示。ALOS-2数据具有高分辨率和强穿透力的优点,有利于山区发现滑坡灾害体细微形变,且在

表1 ALOS-2 影像参数

Table 1 ALOS-2 imaging parameters

影像信息	影像参数
轨道方向	升轨
成像模式	条带成像模式
距离向分辨率	1.43 m
方位向分辨率	1.85 m
入射角	42.898°
波段/波长	L 波段/23.6 cm
飞行方向角	-9.773°

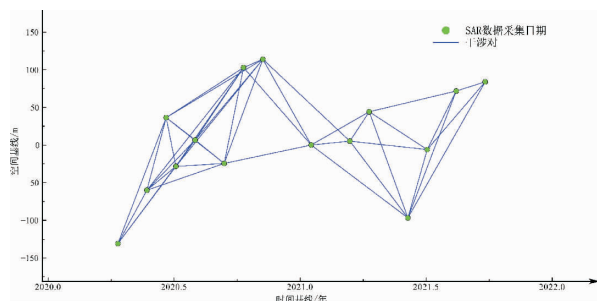


图3 影像时空基线图

Fig. 3 Spatio-temporal baseline map of the image

植被覆盖度较高的监测区有较好的应用优势。外部DEM为30 m分辨率的SRTM DEM数据,用来去除地形效应。

1.2.2 水文数据

水位数据来自千里眼水雨情查询系统开源数据,包括了对应时间区间三峡水库每天的上游水位、下游水位、入库、出库数据(每4 h)。降水数据来源于宜昌气象站点的每日降水量数据(如图4)。

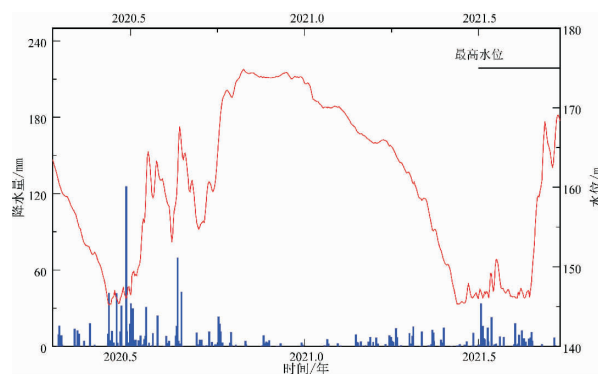


图4 水位和降水数据

Fig. 4 Water level and precipitation data

1.3 MintPy

MintPy(The Miami InSAR Time-series software in Python)是一种常用的小基线集干涉测量技术(SBAS-InSAR),旨在通过设置合适的时空基线阈值来减少失相关的影响,从而提高相干性。MintPy的初始数据为解缠相位、相干性、DEM、查找表、入射角等,数据处理过程主要有5步,其技术流程如图5所示。

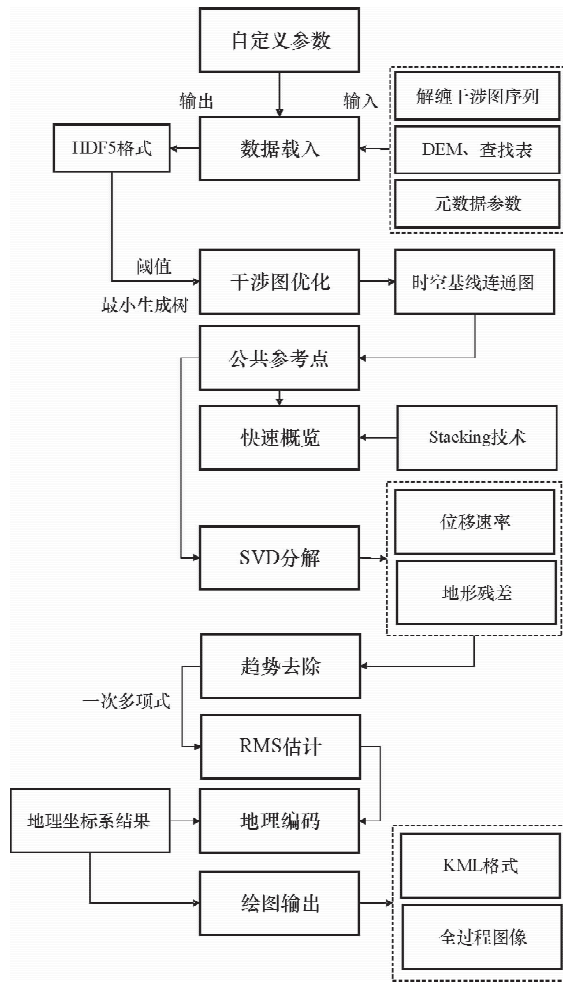


图 5 MintPy 工作流程图
Fig. 5 MintPy workflow diagram

首先, MintPy 对输入的干涉对进行优化处理, 以平均相干性的倒数作为权重, 基于最小生成树算法生成干涉图网络, 通过设置有效相干比^[21] (本文的阈值为 0.6), 从而精化干涉对; 然后, 选取高相干且稳定的区域作为参考区域, 本文根据目视判读和先验信息选取了参考区域, 如图 2 中黑色矩形框所示; 接着, 基于解缠相位采用一次多项式拟合来去除轨道噪声; 最后, 采用 SVD 分解分离形变信号和地形残差, 以协方差倒数作为权重, 使用加权最小二乘法 (WLS) 解算得到时序形变, 并通过拟合得到平均形变速率。为了获取地理坐标下的形变结果, 对所有结果进行地理编码。

2 结果与分析

2.1 形变的时空特征分析

通过 MintPy 获得了宋家屋场滑坡 2020 年 4 月至 2021 年 9 月间雷达视线方向 (LOS 向) 上的平均形变速率。其中, 负值表示滑坡位移沿着远离卫星的方向, 正值表示滑坡位移朝着卫星的方向。根据稳定性原则, 将形变绝对值超过平均值一倍标准差 (11 mm/yr) 的区域认为是形变区域^[22], 以降低不确定性的影响, 在此范围基础上考虑滑坡的自然形态和形变特征, 对滑坡范围进行了识别和划分, 如图 6 所示。蓝色范围是识别的滑坡边界, 红色范围划分是对形变绝对值超过 40 mm/yr 的重点滑移区根据滑移形态的进一步分区。

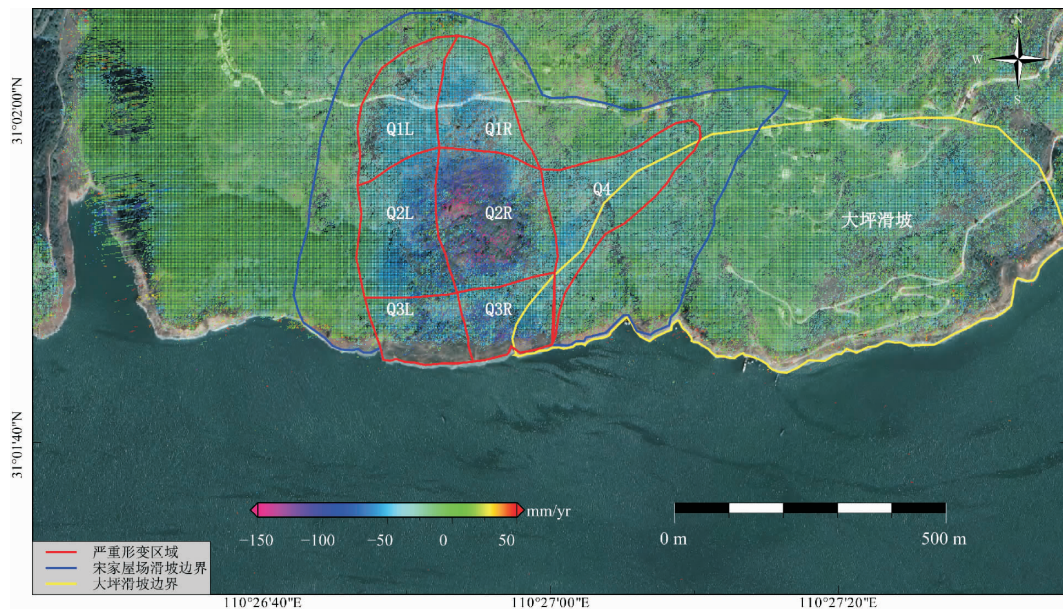


图 6 平均形变速率图
Fig. 6 Average deformation rate

从图6可以看出,宋家屋场滑坡的整体形变是一个向河道张开的水滴形,沿坡向呈现“上段-中段-下段”的台阶状分布。为了更加清晰地分析该滑坡形变的时空特性,本文将重点形变区域从上至下划分为上、中、下3个部分,从左至右划分为左和右两个部分。整体上,滑坡滑移以Q2R形变最为明显,最大形变速率约 -193.9 mm/yr 。可以看到,滑坡面右侧的形变(Q1R、Q2R、Q3R)大于左侧(Q1L、Q2L、Q3L)的,结合文献^[20]实地勘察情况,可能是由于滑坡前缘(Q3R)右侧出现塌岸,创造了向前滑动的临空位置。此外,滑坡面中段和下段的形变之间存在明显的界线,导致这一现象的原因可能是两个区域滑坡壁的地质结构的差异(图3),其中,上段和中段主要为中统巴东组第二组(T_2b^3),下段主要为中统巴东组第二组(T_2b^2)。Q4区域位于宋家屋场与大坪滑坡^[20]的交界带,在形态上与大坪滑坡的边界吻合,认为是大坪滑坡较小的边缘产生的较小滑移,也对新滑坡的滑移有一定的贡献。

统计结果显示,在识别的滑坡范围内,有69 741个相干点,相干点的平均形变速率为 -36.7 mm/yr 。各分区的形变情况统计如表2,其中,中段和下段是形变最严重的区域,涉及的区域最大形变速率达到 -193.9 、 -146.6 、 -145.3 、 -153.1 mm/yr 。

表2 各分区形变情况统计

Table 2 Deformation statistics of each partition

区域	相干点数	平均形变速率 $\text{/(mm} \cdot \text{yr}^{-1}\text{)}$	最大形变速率 $\text{/(mm} \cdot \text{yr}^{-1}\text{)}$
Q1L	6 640	-34.5	-60.5
Q1R	5 764	-39.6	-85.2
Q2L	9 221	-46.0	-146.6
Q2R	7 654	-75.0	-193.9
Q3L	3 003	-42.0	-143.3
Q3R	6 414	-40.5	-153.1
Q4	10 149	-31.0	-96.1

为了还原滑坡的孕育过程,本文获取了宋家屋场滑坡的形变时间序列,结果如图7所示。

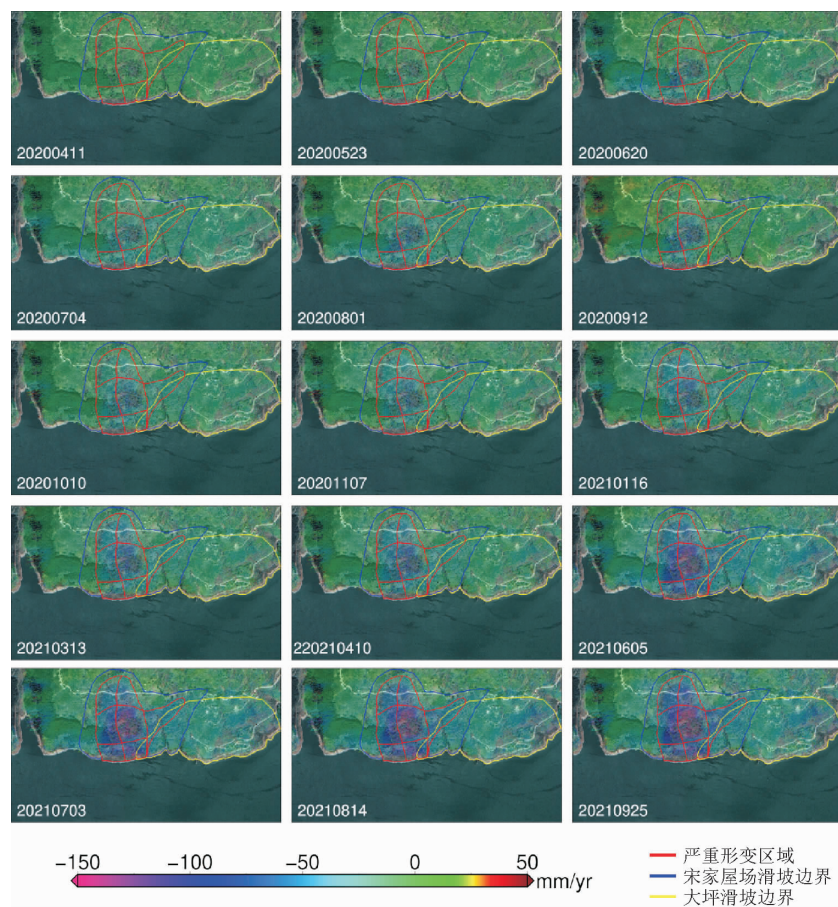


图7 时序形变

Fig. 7 Deformation time-series

滑坡面的滑移发育开始于 Q2L 和 Q2R, 随后, Q1R 区域出现滑移, 接着, Q4 区域也逐渐开始滑移, 此后, 滑移呈现整体发育并在 2021 年 4 月发生整体加速, 尤其是滑坡 Q2R 区域, 整个区域累积形变量超过 120 mm, 最大处达到 257.3 mm。由滑坡面的时序形变可以总结出宋家屋场滑坡的孕育过程: 滑坡面主要由中段滑移的牵拉带动上段的滑移, 整体上呈现分段的台阶式形变, 接近坡底位置的滑移为远离坡底位置的滑移创造了临空面条件, 远离坡底位置的滑移为接近坡底位置滑移施加了滑移压力, 最终呈现整体加速滑移的形态。

2.2 精度评价

形变精度通常分为绝对精度和相对精度, 其中, 绝对精度依赖于外界实测数据, 而相对精度通常指数据本身的精度。针对滑坡形变监测而言, 绝对精度通常因缺乏实测数据而难以开展, 稳定区域的形变统计值常被用来衡量数据的质量。本文选取了两个参考区域以外的稳定区域, 如图 8 所示。统计的形变区和稳定区的标准差和平均值如表 3 所示, 可见稳定区域 1、2 的平均值分别为 -0.9 mm 和 0.2 mm, 标准差分别为 1.3 mm 和 2.6 mm, 标准差分布如图 8(a) ~ 图 8(b), 验证了形变结果的可靠性。

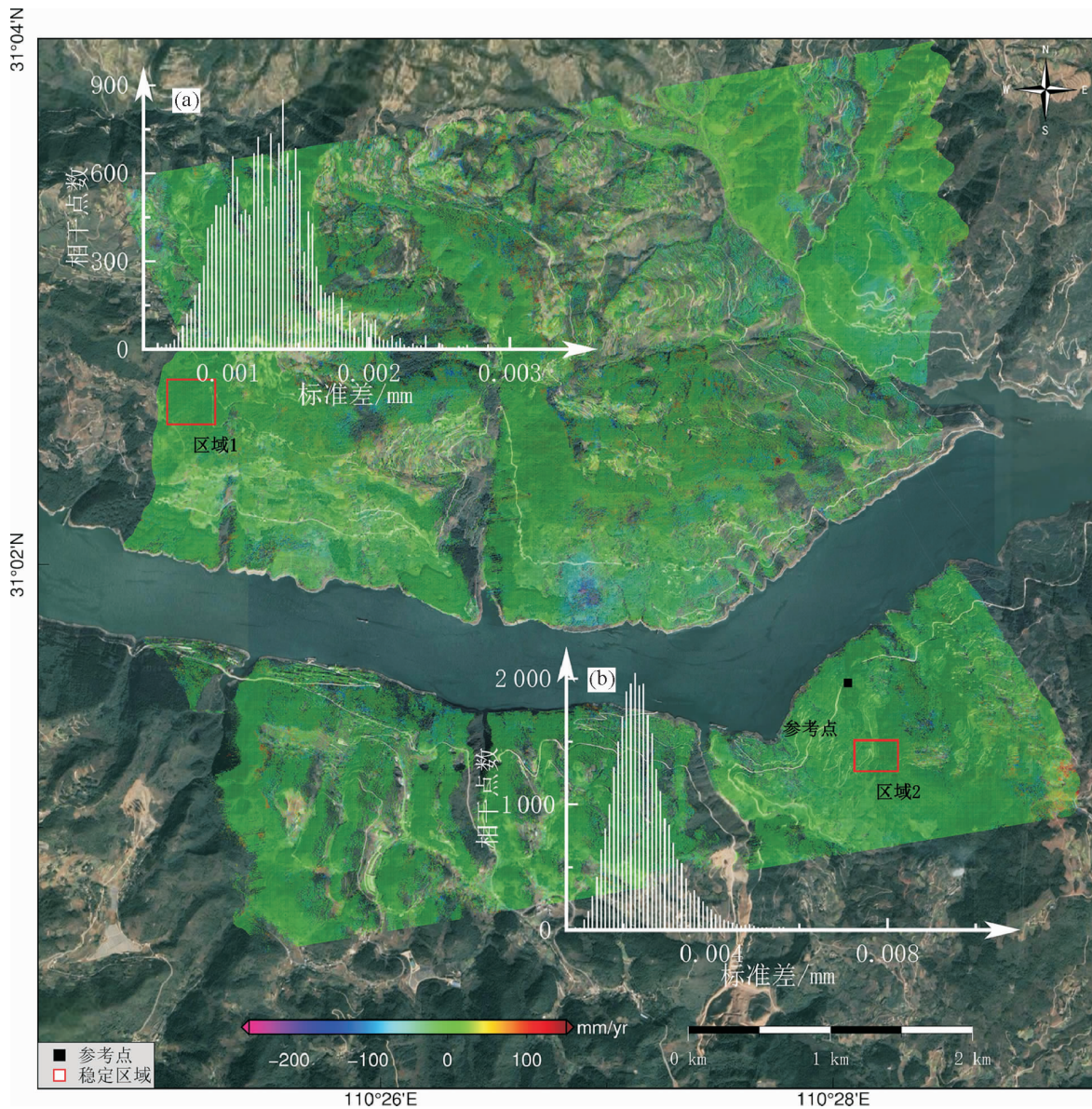


图 8 稳定区域位置及标准差分布

Fig. 8 Location of stabilization regions and standard deviation distribution

表3 稳定区域统计

Table 3 Statistics on stabilized regions

区域	面积/m ²	相干点数目	标准差均值/mm	形变平均值/mm
稳定区域1	2.18 × 10 ⁵	29 696	2.5	-0.8
稳定区域2	7.61 × 10 ⁴	18 387	1.3	0.2

2.3 形变特征分析

2.3.1 特征点分析

文章选取了滑坡面上分别位于滑坡上段、中段和下段的3个特征点,并绘制其时序形变,从而获取宋家屋场滑坡的形变发展趋势,结果如图9所示。其中,P1点位于滑坡的上段,形变主要呈

现较为缓慢的均匀变化,最大的累积形变达到68.8 mm。与P1点不同,P2点的形变存在一个明显的加速,加速发生在2021年4月,累积形变达到了230.5 mm。与P2点相似,底端的P3点进行了两次加速运动,分别发生在2020年7月和2021年4月。

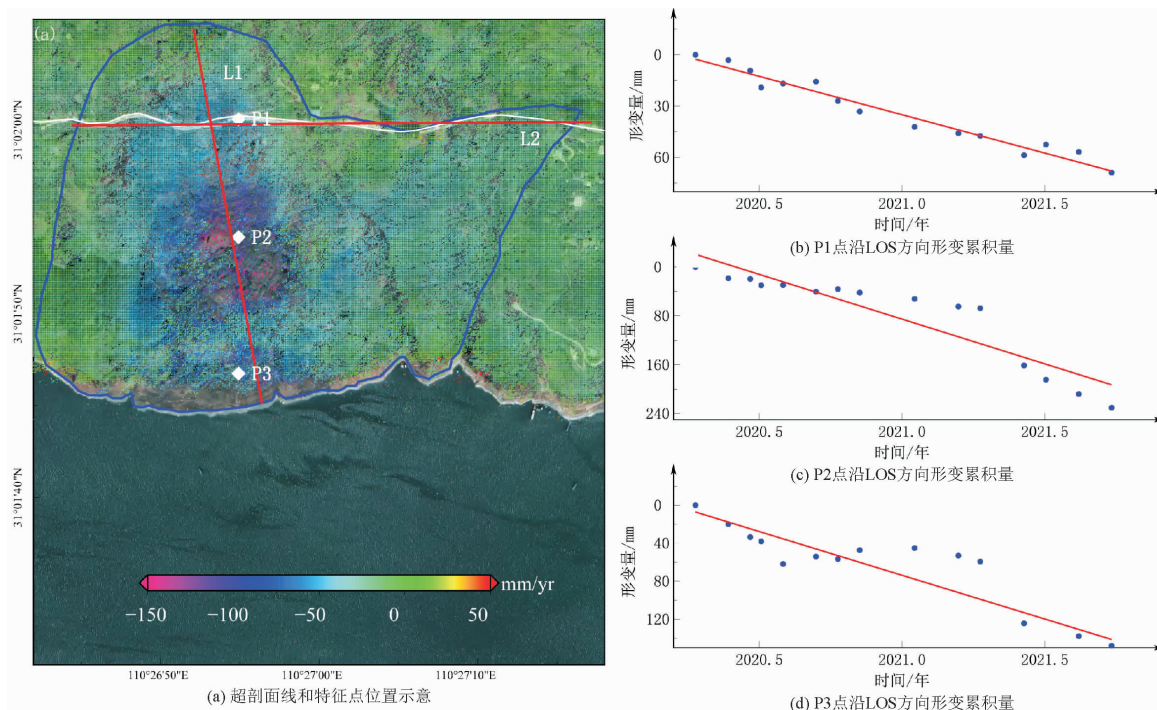


图9 累积形变速率和特征点

Fig. 9 Cumulative deformation rate and characteristic points

为了进一步挖掘时序形变背后的成因,本文收集了宋家屋场滑坡周围雨量计的降雨量和对应的三峡水库的水位数据,使用 Pearsen 相关系数法分析两种因素和形变的关系,结果如表4所示。在特征点1的位置,两种因素(降雨量与水位)与形变量的呈现明显的线性关系, Pearson 系数为0.96和0.95,可以认为,在滑坡上段,降水量是导致形变的主要因素之一,降水量的变化会直接影响到形变的加速度变化;在特征点2的位置,形变量对水位变化和降水量的响应仍然显著;特征点3在水位变化和降水量两个因素上,相关性系数几乎相等,这可能是由于三峡大坝的蓄水泄洪受人

为控制,在正常情况下水位周期与雨季周期同步,导致两者之间具有类似的影响效应。

表4 相关性统计

Table 4 Correlation statistics

累积形变量	累积水位变化 (相关性系数/ 显著性系数)	累积降水量 (相关性系数/ 显著性系数)
特征点1	0.964 6/0.000	0.948 7/0.000
特征点2	0.844 6/0.001	0.816 3/0.002
特征点3	0.826 3/0.001	0.826 4/0.002

2.3.2 剖面线分析

为了更加清楚地分析滑坡面的形变特征,本

文选取了横纵两条剖面线,如图 9 中红色实线所示,从而得到剖面线上特征点平均形变速率的变

化规律,如图 10 所示。

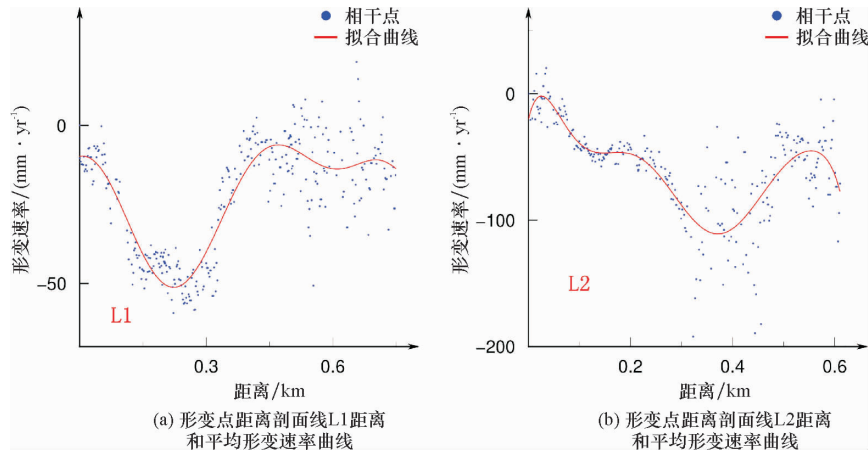


图 10 剖面形变速率曲线

Fig. 10 Profile deformation rate curve

L1 是沿公路截取的横向剖面线,反映了滑坡上段东西向上的空间形变特征,形变左段呈现漏斗状,最大滑移速率超过 -60 mm/yr ,右端形变在 -15 mm/yr 左右波动,不均匀的形变可能会威胁到公路的安全,尤其是在形变存在梯度变化的位置,较大的形变差可能会导致道路边缘破碎、道路裂缝甚至中断。位于南北向的 L2 显示出滑坡上段的形变主要集中在 -50 mm/yr ,滑坡中段存在大量级的滑移,形变点的离散程度较大,这是由于按照一定缓冲距离选择的相干点在该段的横向上同样存在较大的形变梯度。值得注意的是,滑坡下段滑移速率和中段出现分离,且变化幅度较大,这可能是地层变化和水位变化双重作用的结果,并且下段区域失相干更严重,监测点密度明显较少,可能存在形变的探测缺失问题。

2.4 应用价值

本研究探索了 L 波段 ALOS-2 数据在宋家屋场单体滑坡形变监测中的应用,揭示了滑坡面的形变细节,为后续滑坡发育特征的分析提供了一定的数据支撑。与此同时,通过注重分析降雨量、水位和地层类型与形变之间的关系,揭示了宋家屋场滑坡的孕灾因子,该发现能够一定程度上为后续滑坡的防灾减灾提供必要的科学依据。

3 结论

本文采用 15 景升轨 ALOS-2/PALSAR-2 影像

获取了宋家屋场滑坡 2020 年 4 月至 2021 年 9 月期间的形变信息,滑坡整体上呈现台阶状沉降,通过将滑坡面从上至下、从左至右进行区域划分,发现滑坡中段滑移最为严重,最大形变速率达 -193.9 mm/yr ,右侧沉降大于左侧。为了进一步分析滑坡形变的时空特征,本文提取了滑坡不同区域特征点的时序形变和剖面线的平均形变速率,滑坡从中下段开始滑移,逐渐牵动上段整体滑移,滑移在雨季有明显加速。滑移形态上与滑坡壁地层分布存在关联,在地层转变处存在形变分离带。此外,本文还计算了特征点形变与降雨量和水位之间的相关性,可以发现,特征点位置的形变和两者都有明显的相关性,其中,滑坡上段和中段特征点的水位变化相关性 ($P1/0.96, P2/0.84$) 较降雨量 ($P1/0.95, P2/0.82$) 的大,下段特征点两者与形变的相关性相同 ($R = 0.83$)。这也进一步说明,滑坡面的形变是降雨量与水位共同作用的结果。

本文通过时序 InSAR 技术获取了滑坡面形变的时空特征,为宋家屋场滑坡未来的风险评估和科学研究提供数据支撑。然而本文仅采用了升轨 ALOS-2 数据获取了 LOS 向的形变,缺少降轨数据辅助下的三维形变监测。同时,研究区缺少实测数据,无法获得形变监测的绝对精度,这也是未来进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 崔鹏. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题[J]. 地理科学进展, 2014, 33(2): 145-152.
- [2] 柳林, 宋豪峰, 杜亚男, 等. 联合哨兵2号和Landsat8估计白格滑坡时序偏移量[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1461-1470.
- [3] 廖明生, 董杰, 李梦华, 等. 雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 332-341.
- [4] 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.
- [5] Sun M, Du Y, Liu Q, et al. Understanding the spatial-temporal characteristics of land subsidence in Shenzhen under rapid urbanization based on MT-InSAR[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2023, 16: 4153-4166.
- [6] 刘晓杰, 赵超英, 李滨, 等. 基于 InSAR 技术的甘肃积石山震区活动滑坡识别与动态形变监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024. doi: 10.13203/j.whugis20240054.
- [7] Tizzani P, Berardino P, Casu F, et al. Surface deformation of Long Valley caldera and Mono Basin, California, investigated with the SBAS-InSAR approach[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 108(3): 277-289.
- [8] Hu J, Li W Z, Ding L X, et al. 3D coseismic Displacement of 2010 Darfield, New Zealand earthquake estimated from multi-aperture InSAR and D-InSAR measurements[J]. Journal of Geodesy, 2012, 86(11): 1029-1041.
- [9] Jiang Y, Liao M, Zhou Z, et al. Landslide deformation analysis by coupling deformation time series from SAR data with hydrological factors through data assimilation[J]. Remote Sensing, 2016, 8(3): 179.
- [10] Liu G, Guo H, Perski Z, et al. Monitoring the slope movement of the Shuping landslide in the Three Gorges Reservoir of China, using X-band time series SAR interferometry[J]. Advances in Space Research, 2016, 57(12): 2487-2495.
- [11] Shi X, Zhang L, Zhou C, et al. Retrieval of time series three-dimensional landslide surface displacements from multi-angular SAR observations[J]. Landslides, 2018, 15(5): 1015-1027.
- [12] Shi X, Jiang H, Zhang L, et al. Landslide displacement monitoring with split-bandwidth interferometry: A case study of the Shuping landslide in the Three Gorges Area[J]. Remote Sensing, 2017, 9(9): 937.
- [13] 王佳, 朱鸿鹄, 叶霄, 等. 考虑时滞效应的库区滑坡位移预测——以新铺滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1609-1619.
- [14] 郭澳庆, 胡俊, 郑万基, 等. 时序 InSAR 滑坡形变监测与预测的 N-BEATS 深度学习法——以新铺滑坡为例[J]. 测绘学报, 2022, 51(10): 2171-2182.
- [15] Tomás R, Li Z, Lopez-Sanchez J M, et al. Using wavelet tools to analyse seasonal variations from InSAR time-series data: A case study of the Huangtupo landslide[J]. Landslides, 2016, 13: 437-450.
- [16] 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.
- [17] 郑岳泽. InSAR 技术在三峡库区滑坡监测中的应用研究[D]. 北京:中国地质大学, 2019.
- [18] 董佳慧, 牛瑞卿, 亓梦茹, 等. InSAR 技术和孕灾背景指标相结合的地灾隐患识别[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 187-196.
- [19] Dong J, Niu R, Li B, et al. Potential landslides identification based on temporal and spatial filtering of SBAS-InSAR results [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2023, 14(1): 52-75.
- [20] 王世梅, 潘宇晨, 王力, 等. 三峡库区大坪滑坡变形对前缘塌岸的响应分析[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 647-656.
- [21] Kang Y, Lu Z, Zhao C, 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.
- [22] Ali E, Xu W, Ding X. Improved optical image matching time series inversion approach for monitoring dune migration in North Sinai Sand Sea: Algorithm procedure, application, and validation[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 164: 106-124.