

DOI:10.13203/j.whugis20210247



文章编号:1671-8860(2021)10-1560-09

利用2016—2020年 Sentinel-1 数据监测与分析三峡库区树坪滑坡稳定性

朱同同¹ 史绪国¹ 周超¹ 蒋厚军² 张路³ 廖明生³

¹ 中国地质大学地理与信息工程学院,湖北 武汉,430078

² 安徽建筑大学土木工程学院,安徽 合肥,230601

³ 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

摘要:由于不良地质条件和周期性蓄水等因素影响,中国三峡库区岸坡的稳定性问题一直备受关注。获取了覆盖树坪滑坡周围区域2016-03—2020-03的111景哨兵1号(Sentinel-1)数据,利用时间序列合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)对该数据集中的高相干点目标和分布式目标进行分析,获取实验区坡体变形。结果显示,实验区内有7处坡体处于活跃状态,最大变形速率达到70 mm/a。与树坪滑坡GPS形变观测值进行比较,验证了InSAR结果的有效性。通过对树坪和三门洞等典型滑坡的时序分析发现,库区水位和集中降雨是滑坡变形的主要影响因素,实验区内的治理工程有效减缓了变形趋势。与此同时,公路建设与植被耕种等人类活动引起了熊家岭村等出现地面沉降,需密切关注以防止出现安全隐患。所得结果证明时序InSAR技术可以有效识别和监测滑坡,为地质灾害风险普查以及防灾减灾治理成效评价提供技术支持。

关键词:树坪滑坡;形变监测;时序InSAR;库水位;降雨

中图分类号:P237

文献标志码:A

滑坡是由岩土类型、地形地貌等内部地质条件和降雨、地震、人类活动等外部触发因素引起的边坡失稳现象^[1]。中国地质条件复杂,板块构造活动频繁,近年来受人类活动和全球气候变化影响,灾难性滑坡地质灾害频发,严重威胁人类生命财产的安全^[2]。2017-06-24,由于降雨影响,四川茂县新磨村发生滑坡,共造成10人死亡,73人失踪^[3]。2017-08-28,贵州纳雍县张家湾镇普洒村由于长期煤矿开采活动使岩体产生裂缝,最终导致高位崩塌发生,共造成26人遇难,9人失踪,8人受伤^[4]。2018年10月和11月金沙江白格发生两次滑坡-堰塞堵江,共避险转移3.42万人,直接经济损失达上百亿元^[5]。山区滑坡灾害具有高位、隐蔽性,事后调查发现70%以上的已发滑坡不在已知隐患点内^[6-7],因此,开展地质灾害的早期识别与监测工作迫在眉睫。

传统的变形监测手段如水准测量和全球导航卫星系统(global navigation satellite system,

GNSS)等虽然精度高,但都是基于点的稀疏观测,不适宜大范围地质灾害普查^[8-9]。遥感作为一种非接触、远距离探测技术,在广域滑坡制图和监测中发挥着越来越重要的作用^[10-11]。合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术利用多次重复观测的合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像相位信息获取地表微小变形,在地质灾害监测与识别中发挥了重要作用^[12]。

2003年,三峡库区实验性蓄水至135 m后千将坪滑坡失稳^[13-14],造成严重的人员伤亡与经济损失,库区坡体稳定性问题也引起广泛关注。由于三峡库区周期性蓄水和不良地质条件的影响,长江沿岸很多坡体具有很高的失稳风险^[15]。2000年,文献[16]率先在三峡库区新滩滑坡、链子崖危岩体和树坪等典型滑坡布设角反射器,开展差分干涉测量(differential interferometric synthetic aperture radar, DInSAR)技术滑坡监测,结

收稿日期:2021-05-17

项目资助:国家自然科学基金(41774006,41702376,41907253)。

第一作者:朱同同,硕士生,主要从事星载雷达干涉测量方法与应用研究。zhutongtong@cug.edu.cn

通讯作者:史绪国,博士,副教授。shixg@cug.edu.cn

果与实测数据吻合,初步验证了 DInSAR 技术滑坡监测的可行性。但由于库区植被覆盖茂密,高程起伏大,时空去相干和大气扰动等干扰因素限制了 DInSAR 技术的应用。为了克服上述问题,时间序列 InSAR 分析技术通过对多时相 SAR 数据集中的高相干点目标和短时间内保持相干的分布式目标进行分析,分离干扰信号,大大提高了形变监测精度,在三峡库区典型滑坡监测中取得成功应用。文献[17-19]分别采用小基线集数据集(small baseline subset, SBAS)、永久散射体干涉测量(persistent scatterer interferometry, PSI)和准永久散射体(quasi persistent scatterer, QPS)技术对巴东黄土坡滑坡变形进行监测,获取滑坡的变形特征。文献[20]通过与实测数据比较,验证了 SBAS 方法获取的木鱼包滑坡变形结果的可靠性,并揭示了滑坡变形分布特征和对库水位变化的响应情况。文献[21]通过对比藕塘滑坡周围区域 2007—2011 年先进陆地观测卫星(advance land observing satellite, ALOS)相控阵型 L 波段合成孔径雷达(phase array L-band SAR, PALSAR)和 2015—2018 年哨兵 1 号(Sentinel-1)数据集的 InSAR 结果,发现因为人类活动的影响出现了新的滑坡。文献[22]通过对时序 ALOS PALSAR 数据集进行分析,获取了三峡奉节到秭归区域的坡体变形速率,成功识别出范家坪和黄土坡滑坡等 30 个滑坡。文献[23-24]采用 2012 年库区水位稳定时期的高分辨率 X 波段陆地 SAR(X-band terrace SAR, TerraSAR-X)数据对树坪滑坡进行监测,确定滑坡主要变形区范围。由于树坪滑坡整体形变较大,形变速率最快可以达到 $35 \text{ mm/d}^{[25]}$,给长江航运造成极大安全威胁,因此,2014-08—2015-06,相关部门对树坪滑坡集中加速变形区进行减重应急治理^[26],并利用 GPS 对治理后关键位置进行监测,但监测点覆盖十分有限。因此,需对治理后的树坪滑坡进行必要的监测分析,获取其变形范围及时空特征。

本文利用时序 InSAR 技术对 2016-03—2020-03 Sentinel-1 数据集进行分析,获取树坪滑坡及周围区域坡体变形速率,识别活跃滑坡。通过对树坪和三门洞等典型滑坡的时序变形分析,获取滑坡的变形特征和影响因素。此外,还对熊家岭村地表变形的影响因素进行了讨论。

1 实验区与数据

树坪滑坡位于中国湖北省宜昌市秭归县境

内,区域内长江水道贯穿,分布有青干河、童庄河等长江一级支流(见图 1)。实验区气候湿润,降雨连续集中,雨季月平均降雨量为 $150 \sim 460 \text{ mm}$ 。实验区地势西南高东北低,坡度 $30^\circ \sim 40^\circ$,高程范围在 $500 \sim 750 \text{ m}$ 。图 1 中黑色矩形框区域为本文实验区,区内分布有由褶皱向上拱起形成的百福坪-流来观背斜构造。地层岩性以砂岩泥岩等极软岩为主,长江干流斜坡表面主要由三叠系中统巴东组泥岩、粉砂岩夹泥灰岩组成。支流主要为侏罗系中下统聂家山组紫红色中厚层泥质粉砂岩、长石石英砂岩夹生屑灰岩组成^[27]。脆弱岩性和复杂地质构造使该区滑坡发育^[27],如图 1 中所示。目前已知 22 处滑坡灾害点,其中长江干流沿岸发育有树坪滑坡在内的 7 个灾害点。青干河右岸共发育 3 个灾害点,青干河左岸和锣鼓洞河左岸灾害点分布较为集中,共计 12 处。

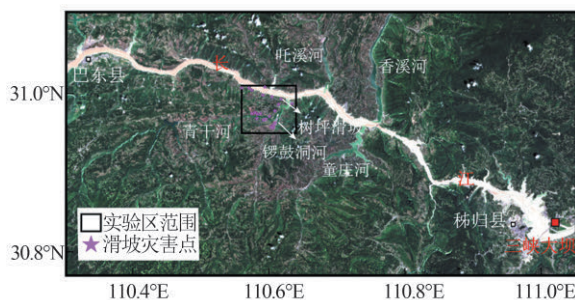


图 1 实验区

Fig. 1 Study Area

本文收集 2016-03—2020-03 的宽幅干涉模式(interferometric wide, IW) Sentinel-1 升轨数据 111 景。IW 模式的单视复数影像(single look complex, SLC)一般由 3 个测绘子带组成,每个子带包含 9 个 burst^[28],覆盖范围约 250 km 。为了保持相干性,本文仅对夏天获取的数据进行两个周期以内的干涉组合,对冬天数据进行 3 个周期以内干涉组合,干涉对组合情况如图 2 所示。本文获取了覆盖实验区 30 m 分辨率的 AW3D DSM (ALOS World 3D Digital Surface Model)^[29]进行辅助配准、差分干涉图生成和地理编码;获取了位于树坪滑坡上的两个 GPS 站点 ZG86 和 SP-6 的 2016—2018 年观测数据验证 InSAR 结果;获取 2016—2020 年的巴东气象站点日值降雨数据和三峡上游水位数据用于滑坡稳定性影响因素分析。

2 时序 InSAR 处理

获取 Sentinel-1 IW 数据时,天线波束在每个

burst成像时间内从后往前摆动,方位向多普勒中心频率也随之发生变化。因此,要实现可靠的InSAR数据处理,需要达到优于0.001像素的配准精度^[30]才能避免数据拼接时的相位误差。本文采用AW3D DSM和Sentinels精密定轨产品用于burst间的几何配准,并利用**增强谱分集**方法来估计时间序列的方位偏移,进行精配准^[28, 30]。对配准和拼接的SLC数据进行图2所示的组合,生成相应的差分干涉图。

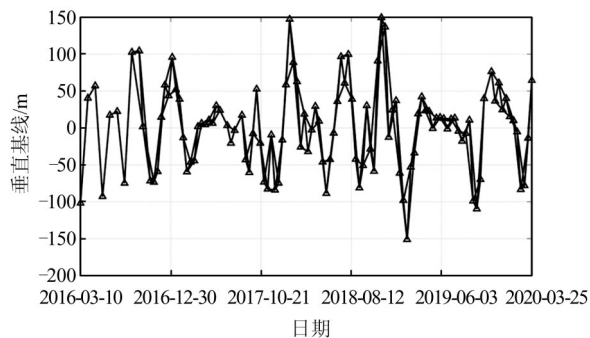


图2 干涉图组合

Fig.2 Interferograms Combination

SAR影像中的像素可以分为永久散射体像素和分布式散射体像素。永久散射体稳定性高,适合于做形变监测,但在自然环境中数量有限。分布式散射体在自然场景中分布广泛,但相位稳定性差。本文采用了**快速分布式目标探测方法**提取干涉图中的分布式像素同质点集,对生成的干涉图进行滤波以提高分布式目标像素稳定性^[31]。首先采用传统的振幅离差方式剔除掉稳定性差的像素,然后对初选点进行相位稳定性分析获取最终的像素集集合,进行三维相位解缠^[32]。任意像素点 p 在第 i 个干涉图上的解缠相位值 $\phi_{i,p}$ 可以表示为:

$$\phi_{i,p} = \phi_{orb}^{i,p} + \phi_{topo}^{i,p} + \phi_{disp}^{i,p} + \phi_{atm}^{i,p} + \phi_n^{i,p} \quad (1)$$

式中, $\phi_{orb}^{i,p}$ 、 $\phi_{topo}^{i,p}$ 、 $\phi_{disp}^{i,p}$ 、 $\phi_{atm}^{i,p}$ 和 $\phi_n^{i,p}$ 分别表示由于**轨道不确定性**、数字高程模型(digital elevation model, DEM)误差、**地表变形**、**大气**和噪声引起的相位分量。每个分量都可以根据其特点逐个求出。其中,轨道相位分量可以通过双线性多项式拟合估计^[22];高程误差相关相位分量可以利用垂直基线和DEM误差之间的线性关系,通过最小二乘法确定;大气分量则通过与高程组成的线性模型以及组合滤波的方式联合获取^[33]。在移除上述相位分量后,时序变形信号可以通过奇异值分解得到。

3 时序InSAR结果分析

3.1 滑坡平均形变速率

本文共探测到76 081个点目标,点密度约为1 490个/ km^2 。图3给出了实验区2016—2020年的视线向年平均变形速率图,红色(负值)表示目标远离卫星,蓝色(正值)表示目标靠近卫星。其中,周家岭滑坡、渗水槽滑坡、树坪滑坡、沙镇溪港口滑坡、周家坡滑坡和三门洞滑坡与已知滑坡灾害点吻合;其余已知灾害点速率稳定。锣鼓洞河沿岸沙镇溪镇主要居民区以及青干河大桥附近没有探测到变形信号。青干河沿岸三门洞和周家坡两处已知滑坡灾害点变形最显著,其余灾害点平均变形整体表现较为稳定。长江干流沿岸除去树坪、渗水槽和周家岭三处变形较为明显的滑坡,还发现东坡不稳定滑坡。位于长江干支流交汇处的沙镇溪港口滑坡最大变形速率达到50 mm/a。同时,本文发现熊家岭村等地存在明显的地表变形,最大速率接近45 mm/a。

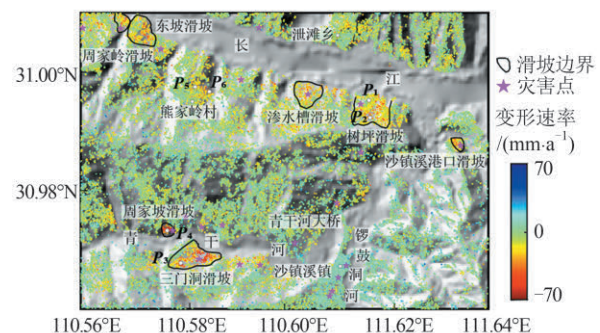


图3 平均变形速率图

Fig.3 Mean Velocity Map

3.2 树坪滑坡稳定性分析

树坪滑坡位于长江右岸,距三峡大坝约47 km。滑坡总体形态为圈椅状,南北向展布,向北倾斜,地势上缓下陡,上下坡角为22°和35°。滑坡南北纵长约800 m,东西宽约700 m,平均厚约50 m,总体积约 $2.75 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。2014-08—2015-06,对图4中树坪滑坡A和B区域进行了削方处理以降低滑坡自重,前缘进行土石方回填压脚来增大抗滑性^[26, 34]。从图4给出的形变速率可以发现削方区目前整体变形速率约为20~40 mm/a,滑坡南北向自然冲沟为集中变形中心,最大变形速率接近70 mm/a。本文将布设在树坪滑坡的两个GPS站点(位置见图4)获取的三维时序变形观测投影至雷达视线向,与邻近InSAR观测值进行对比,如图5所示。ZG86和SP-6点与InSAR点在邻近

观测日期处的差值平均值分别为 7.2 mm 和 10.7 mm, 差值标准差分别为 8.2 mm 和 11.1 mm。误差的原因主要由 GPS 与 InSAR 点在时间和空间上不完全重合导致。总体来看, InSAR 结果与 GPS 监测结果吻合得较好, 验证了 InSAR 结果的可靠性。

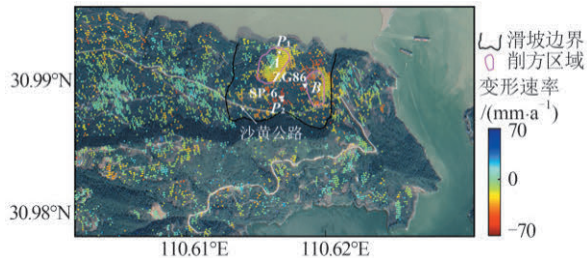
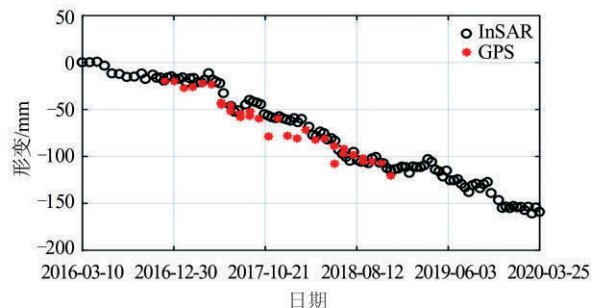


图 4 树坪滑坡平均变形速率图

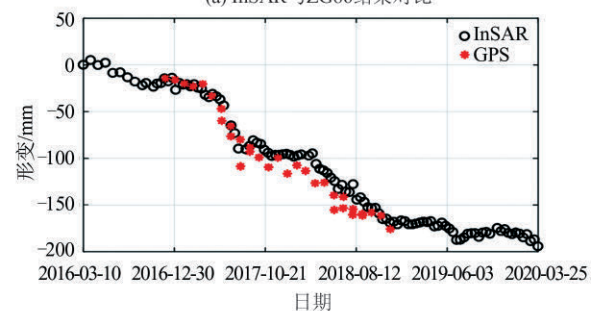
Fig. 4 Mean Velocity Map of Shuping Landslide

库水位变化和降雨是树坪滑坡变形的主要因素, 尤其是库水位下降期间滑坡变形呈现阶跃特征^[23, 35]。前期研究通过对比 2012—2016 年 GPS 监测数据发现树坪滑坡削方后阶跃变形特征消失^[26]。但从图 6 中削方区 P_1 与削方区外 P_2 点的时序变形可以发现滑坡变形的阶跃特征仍然存在。尤其 P_1 点在 2017—2019 年库水位下降时期出现显著的变形加速, 累积滑移量均接近 20 mm。 P_2 点视线向累积变形量达到 150 mm, 变

形主要集中于库水位下降和强降雨时期, 其中 2018 年 4 月—10 月出现约 70 mm 的加速, 因此该点时序变形同样存在与库水位变化相关的小幅阶跃特征。



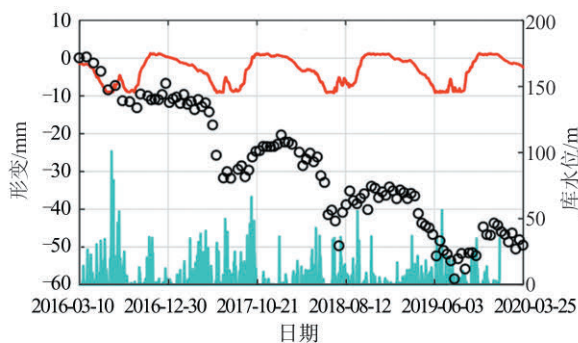
(a) InSAR 与 ZG86 结果对比



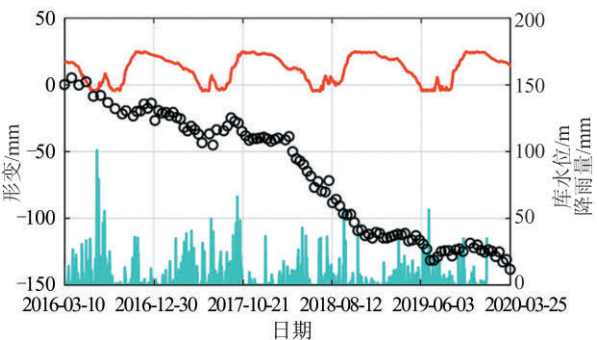
(b) InSAR 与 SP-6 结果对比

图 5 InSAR 与 GPS 变形观测值对比

Fig. 5 Comparison of Displacement Observations Between InSAR and GPS



(a) P_1 点变形与库水位和降雨量对比图



(b) P_2 点变形与库水位和降雨量对比图

○形变 — 库水位 — 降雨量

图 6 P_1 和 P_2 的时序变形与库水位和降雨量对比图

Fig. 6 Comparison of Time-Series Displacement of P_1 and P_2 with Reservoir Water Level and Rainfall

3.3 三门洞和周家坡滑坡稳定性分析

三门洞滑坡位于青干河右岸, 由粘土岩夹粉砂岩构成, 结构松散, 为古崩滑堆积体复活滑坡。坡面呈舌形, 岩层与岸坡走向一致, 坡体下缓上陡, 西高东低, 属于凹形坡。前缘高程约 140 m, 后缘高程约 350 m。滑坡长约 830 m, 宽约 300 m, 面积约 $2.49 \times 10^5 \text{ m}^2$, 平均厚度约 22 m^[36]。周家坡滑坡位于青干河左岸, 地形坡度在 $15^\circ \sim 30^\circ$, 平均厚度约 15 m, 体积为 $1.62 \times 10^6 \text{ m}^3$, 由泥岩和泥

灰岩夹砂岩组成, 与三门洞滑坡同属土质滑坡^[27]。

从图 7 可见, 三门洞滑坡变形主要分布于中部和坡脚处, 前缘邻水区变形速率最快, 后缘较慢, 整体变形由前缘牵引后缘指向青干河, 两侧边缘处变形明显小于中部。位于青干河左岸的周家坡滑坡, 最大变形速率为 66 mm/a, 该滑坡面积较小, 变形分布与地形强相关。图 8 给出了三门洞滑坡 P_3 点和周家坡滑坡 P_4 点的时序变形, 可

以看到两个点的视线向累积变形大于 250 mm。2017-02—2018-08 P_3 和 P_4 点分别出现约 350 mm 和 150 mm 的加速变形,之后变形趋于平缓。

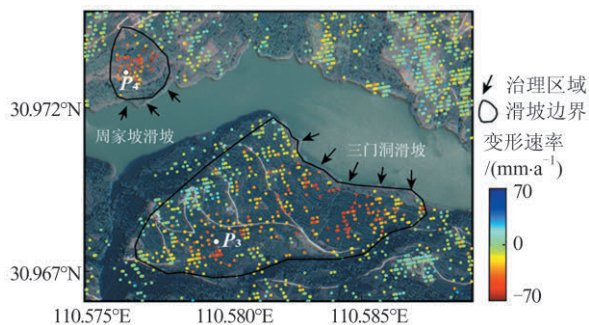


图7 三门洞和周家坡滑坡平均变形速率图

Fig. 7 Mean Velocity Map of Sanmendong and Zhoujiapo Landslides

为了有效抑制时序变形中的测量误差,本文利用最小二乘三次样条方法拟合 P_3 和 P_4 点的变形趋势,拟合结果如图8中绿线所示。通过拟合趋势获取了 P_3 和 P_4 点的变形速率变化,并与库区

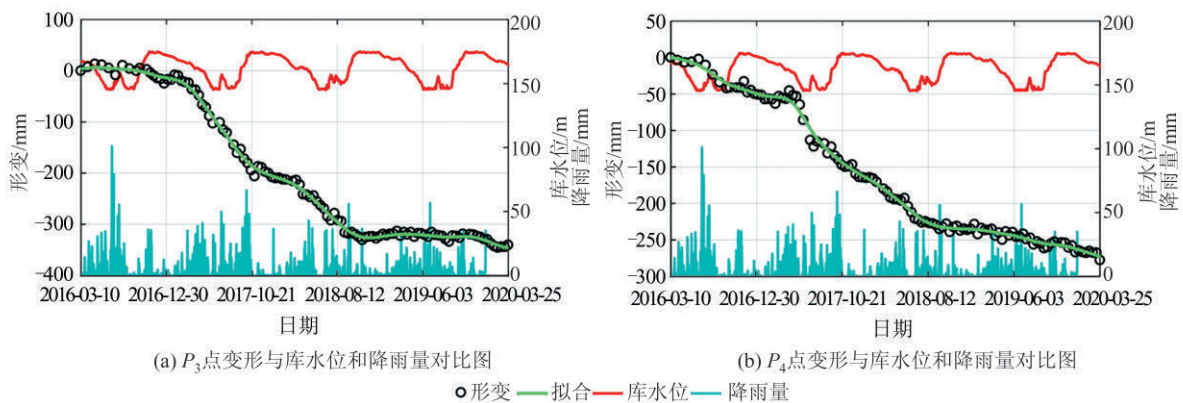


图8 P_3 和 P_4 的时序变形与库水位和降雨量对比图

Fig. 8 Comparison of Time-Series Displacement of P_3 and P_4 with Reservoir Water Level and Rainfall

本文推测三门洞和周家坡滑坡变形速率的变化与2018-04开始的为期16个月的青干河航道整治中的护岸工程有关。图7黑色箭头指向即为护岸工程中进行干砌块石、浆砌块石和喷射砼岸坡防护的位置。

3.4 熊家岭村地表变形分析

本文在实验区内同时发现了与人类活动密切相关的地表变形。该区域2016-04-19和2019-10-01的谷歌影像如图10(a)、图10(b)所示。对比两个时相的影像发现童楚公路附近植被覆盖变化明显,熊家岭村居民区附近新建一条朱石公路,上下贯通墓朱公路和童楚公路。熊家岭村视线向平均变形速率图(见图10(c))显示上述人类活动剧烈的区域存在显著变形。童楚公路附近植被较多,探测到的变形点目标十分稀

疏。新建的朱石公路沿线最大变形速率可达45 mm/a。图11给出了熊家岭村 P_5 和 P_6 点的时序变形图。 P_5 和 P_6 点在2017年分别出现约50 mm和100 mm的加速变形,这可能与朱石公路和童楚公路附近的种植园品种改良有关。此外 P_5 点在2019年再次出现约50 mm的加速变形,这与朱石公路的建设施工密切相关。

4 结语

本文利用时序InSAR技术对2016—2020年Sentinel-1数据进行分析发现树坪及周围地区的7处不稳定滑坡,包括长江干流沿岸的渗水槽、周家岭、沙镇溪港口、树坪和东坡滑坡以及青干河沿岸的三门洞和周家坡滑坡。不稳定滑坡最大

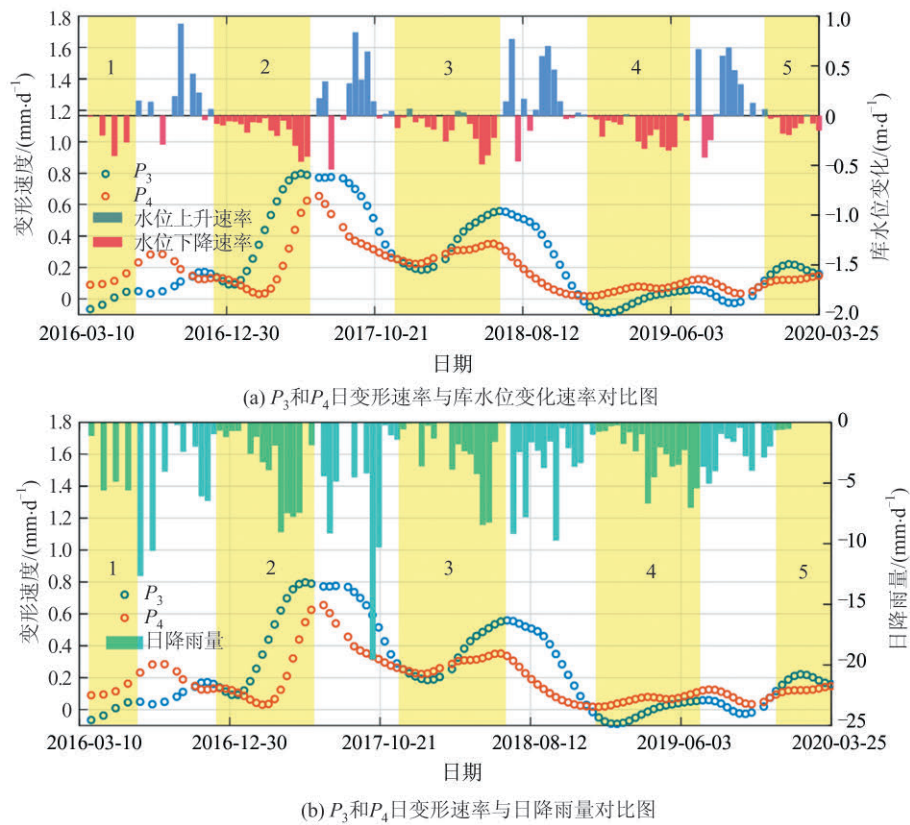


图 9 P_3 和 P_4 的日变形速率与库水位变化速率、日降雨量的对比图

Fig. 9 Comparison of Daily Displacement Velocity of P_3 and P_4 with Reservoir Water Level Change Rate and Daily Rainfall

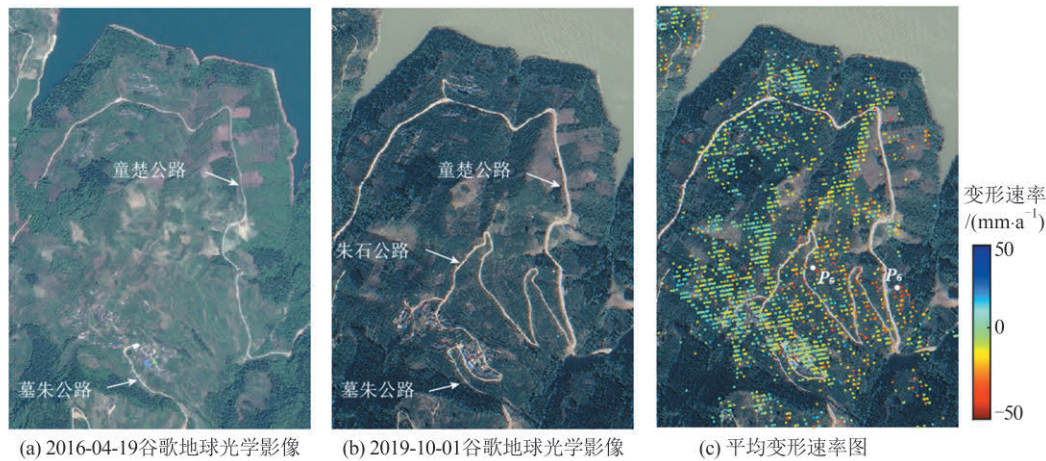


图 10 熊家岭村地表变形

Fig. 10 Ground Displacement of Xiongjialing Village

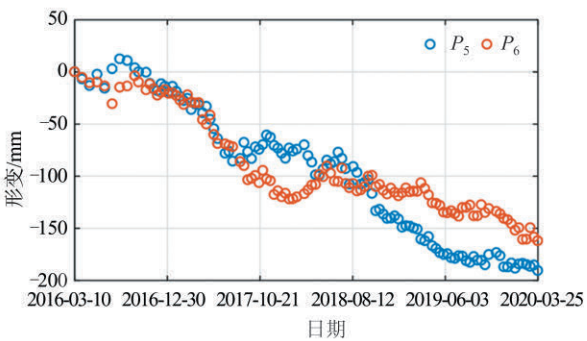


图 11 P_5 和 P_6 的时序变形图

Fig. 11 Time-Series Displacement of P_5 and P_6

形变速率约 70 mm/a。通过将 InSAR 时序形变与对应的 2016—2018 年 GPS 站点观测结果对比分析发现,两种观测手段在 ZG86 和 SP-6 站点差异的均值分别为 7.2 mm 和 10.7 mm,标准差分别为 8.2 mm 和 11.1 mm,验证了 InSAR 结果的有效性。通过对树坪、三门洞和周家坡 3 处滑坡以及熊家岭村地表变形进行特征和影响因素分析,得出以下结论:(1)库水位和降雨的影响。树坪和三门洞等沿岸滑坡在库水位波动时期和集中降雨时期会出现明显的变形加速。(2)治理工程可

以大大减缓滑坡变形速率和影响变形模式。治理后的树坪滑坡南北向自然冲沟为变形中心,滑坡整体变形放缓。三门洞和周家坡滑坡后期受护岸工程影响滑坡变形由快速转为平缓。(3)熊家岭村结果表明,公路建设和经济作物种植等人类活动区域出现显著地表变形,应当予以密切监测,及时排除安全隐患。随着 Sentinel-1 卫星与即将发射的其他 SAR 任务的常规运行,未来可以依靠近实时的海量 SAR 数据开展滑坡等地质灾害风险普查以及防灾减灾治理评价等活动。

参 考 文 献

- [1] Liao Mingsheng, Zhang Lu, Shi Xuguo, et al. Method and Practice of Landslide Deformation Monitoring by Radar Remote Sensing[M]. Beijing: Science Press, 2017(廖明生, 张路, 史绪国, 等. 滑坡变形雷达遥感监测方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2017)
- [2] Huang Runqiu. Large-Scale Landslides and Their Sliding Mechanics in China Since the 20th Century [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 433-454 (黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454)
- [3] Xu Qiang, Li Weile, Dong Xiujun, et al. The Xinmocun Landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: Characteristics and Failure Mechanism [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(11): 2 612-2 628 (许强, 李为乐, 董秀军, 等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2 612-2 628)
- [4] Zheng Guang, Xu Qiang, Ju Yuanzhen, et al. The Pusacun Rock Avalanche on August 28, 2017 in Zhangjiawan Nayongxian, Guizhou: Characteristics and Failure Mechanism [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(1): 223-240 (郑光, 许强, 巨袁臻, 等. 2017年8月28日贵州纳雍县张家湾镇普洒村崩塌特征与成因机理研究 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 223-240)
- [5] Xu Qiang, Zheng Guang, Li Weile, et al. Study on Successive Landslide Damming Events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018 [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1 534-1 551 (许强, 郑光, 李为乐, 等. 2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1 534-1 551)
- [6] Xu Qiang, Dong Xiujun, Li Weile. Integrated Space-Air-Ground Early Detection, Monitoring and Warning System for Potential Catastrophic Geohazards [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 957-966 (许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(7): 957-966)
- [7] Xu Qiang. Understanding and Consideration of Related Issues in Early Identification of Potential Geohazards [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1 651-1 659 (许强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(11): 1 651-1 659)
- [8] Calcaterra S, Cesi C, Di Maio C, et al. Surface Displacements of Two Landslides Evaluated by GPS and Inclinator Systems: A Case Study in Southern Apennines, Italy [J]. *Natural Hazards*, 2010, 61(1): 257-266
- [9] Malet J P, Maquaire O, Calais E. The Use of Global Positioning System Techniques for the Continuous Monitoring of Landslides: Application to the Super-Sauze Earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France) [J]. *Geomorphology*, 2002, 43(1/2): 33-54
- [10] Scaioni M, Longoni L, Melillo V, et al. Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(10): 9 600-9 652
- [11] Tofani V, Segoni S, Agostini A, et al. Technical Note: Use of Remote Sensing for Landslide Studies in Europe [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, 13(2): 299-309
- [12] Yun Ye, Lü Xiaolei, Fu Xikai, et al. Application of Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radar to Geohazard Monitoring [J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(1): 73-85 (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)
- [13] Wang F W, Zhang Y M, Huo Z T, et al. The July 14, 2003 Qianjiangping Landslide, Three Gorges Reservoir, China [J]. *Landslides*, 2004, 1(2): 157-162
- [14] Jian W, Xu Q, Yang H, et al. Mechanism and Failure Process of Qianjiangping Landslide in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(8): 2 999-3 013
- [15] Peng L, Niu R, Huang B, et al. Landslide Susceptibility Mapping Based on Rough Set Theory and Support Vector Machines: A Case of the Three Gorges Area, China [J]. *Geomorphology*, 2014, 204: 287-301

- [16] Ye X, Kaufmann H, Guo X. Landslide Monitoring in the Three Gorges Area Using DInSAR and Corner Reflectors [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2004, 70(10): 1 167-1 172
- [17] 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
- [18] Shi X, Zhang L, Liao M, et al. Deformation Monitoring of Slow-Moving Landslide with L- and C-band SAR Interferometry [J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(11): 951-960
- [19] Perissin D, Wang T. Time-Series InSAR Applications over Urban Areas in China [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2010, 4(1): 92-100
- [20] Zhou C, Cao Y, Yin K, et al. Landslide Characterization Applying Sentinel-1 Images and InSAR Technique: The Muyubao Landslide in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12: 3385
- [21] Shi Xuguo, Xu Jinhua, Jiang Houjun, et al. Slope Stability State Monitoring and Updating of the Outang Landslide, Three Gorges Area with Time Series InSAR Analysis [J]. *Journal of Earth Science*, 2019, 44(12): 4 285-4 292 (史绪国, 徐金虎, 蒋厚军, 等. 时序 InSAR 技术三峡库区藕塘滑坡稳定性监测与状态更新 [J]. *地球科学*, 2019, 44(12): 4 285-4 292)
- [22] Shi X, Liao M, Li M, et al. Wide-Area Landslide Deformation Mapping with Multi-Path ALOS PAL-SAR Data Stacks: A Case Study of Three Gorges Area, China [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8: 136
- [23] 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): 2 487-2 495
- [24] Fan J, Xia Y, Zhao H, et al. Monitoring the Deformation of Shuping Landslide with TerraSAR-X Spotlight Images [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Melbourne, Australia, 2013
- [25] Wu Q, Tang H, Ma X, et al. Identification of Movement Characteristics and Causal Factors of the Shuping Landslide Based on Monitored Displacements [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2018, 78(3): 2 093-2 106
- [26] Yi Qinglin, Wen Kai, Qin Shilei, et al. Analysis on Effect of Emergency Treatment Project of Shuping Landslide in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(11): 165-172 (易庆林, 文凯, 覃世磊, 等. 三峡库区树坪滑坡应急治理工程效果分析 [J]. *水利水电技术*, 2018, 49(11): 165-172)
- [27] Wang Ming. The Spatial Prediction of Bedding Rock Landslide in Three Gorges Reservoir Area of Shazhenxi Town, Zigui County [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2016 (王鸣. 秭归沙镇溪镇三峡库区岩质顺层滑坡的空间预测 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2016)
- [28] Torres R, Snoeij P, Geudtner D, et al. GMES Sentinel-1 Mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 9-24
- [29] Takaku J, Tadono T, Tsutsui K, et al. Validation of 'AW3D' Global DSM Generated from ALOS PRISM [J]. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, 3(4): 25-31
- [30] Jiang M. Sentinel-1 TOPS Co-registration over Low-Coherence Areas and Its Application to Velocity Estimation Using the All Pairs Shortest Path Algorithm [J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(10): 1-15
- [31] Jiang M, Ding X, Hanssen R F, et al. Fast Statistically Homogeneous Pixel Selection for Covariance Matrix Estimation for Multitemporal InSAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 53(3): 1 213-1 224
- [32] Zhang Lu, Liao Mingsheng, Dong Jie, et al. Early Detection of Landslide Hazards in Mountainous Areas of West China Using Time Series SAR Interferometry: A Case Study of Danba, Sichuan [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2 039-2 049 (张路, 廖明生, 董杰, 等. 基于时间序列 InSAR 分析的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*, 2018, 43(12): 2 039-2 049)
- [33] Liao M, Jiang H, Wang Y, et al. Improved Topographic Mapping Through High-Resolution SAR Interferometry with Atmospheric Effect Removal [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 80: 72-79
- [34] Zou Z, Tang H, Criss R E, et al. A Model for Interpreting the Deformation Mechanism of Reservoir Landslides in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2021, 21(2): 517-532
- [35] Song K, Wang F, Yi Q, et al. Landslide Deformation Behavior Influenced by Water Level Fluctua-

tions of the Three Gorges Reservoir (China) [J]. *Engineering Geology*, 2018, 247:58-68

[36] Sun G, Zheng H, Huang Y, et al. Parameter Inversion and Deformation Mechanism of Sanmending

Landslide in the Three Gorges Reservoir Region Under the Combined Effect of Reservoir Water Level Fluctuation and Rainfall [J]. *Engineering Geology*, 2016, 205:133-145

Stability Monitoring and Analysis of the Shuping Landslide in the Three Gorges Area with Sentinel-1 Images from 2016 to 2020

ZHU Tongtong¹ SHI Xuguo¹ ZHOU Chao¹ JIANG Houjun² ZHANG Lu³
LIAO Mingsheng³

¹ School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

² School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China

³ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objectives:** Due to the impact of unfavorable geological conditions and periodic water level fluctuations, the stabilities of the bank slopes in the Three Gorges area have always been concerned. **Methods:** 111 Sentinel-1 images covering the Shuping landslide and its surrounding area from March 2016 to March 2020 are obtained. Time-series interferometric synthetic aperture radar (InSAR) analysis method combining point-like targets and distributed scatters employed to obtain the slope displacement of our study area. **Results:** We identified 7 active slopes with a maximum displacement rate of 70 mm/a. Our InSAR results were validated by comparing measurements with two GPS stations installed on the Shuping landslide from 2016 to 2018. Time-series analysis indicated water level variations and concentrated rainfall are the main impact factors of slopes. Our study indicated landslide control projects will significantly decrease the slope displacement rates of landslides. The maximum displacement rate of the Shuping landslide decreased 70 mm/a after the cutting slope in 2014—2015. The displacement rates of the Sanmending and the Zhoujiapo landslides also reduced from 0.8 mm/d to 0.2 mm/d due to the revetment works from 2018 to 2019. At the meantime, displacement in Xiongjialing Village induced by anthropogenic activities such as road construction and vegetation cultivation need to be monitored closely in case of developing into safety threats. **Conclusions:** Our results indicate that the time-series InSAR technology can effectively identify and monitor active slopes and provide technical support for geological hazard risk mapping and disaster prevention and mitigation.

Key words: the Shuping landslide; displacement monitoring; time-series InSAR; reservoir water level; rainfall

First author: ZHU Tongtong, postgraduate, specializes in radar interferometry and its applications. E-mail: zhutongtong@cug.edu.cn

Corresponding author: SHI Xuguo, PhD, associate professor. E-mail: shixg@cug.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China(41774006,41702376,41907253).

引文格式: ZHU Tongtong, SHI Xuguo, ZHOU Chao, et al. Stability Monitoring and Analysis of the Shuping Landslide in the Three Gorges Area with Sentinel-1 Images from 2016 to 2020[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10):1560-1568. DOI: 10.13203/j.whugis20210247(朱同同, 史绪国, 周超, 等. 利用 2016—2020 年 Sentinel-1 数据监测与分析三峡库区树坪滑坡稳定性[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(10):1560-1568. DOI:10.13203/j.whugis20210247)