

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222304

基于 SBAS-InSAR 技术的三峡库区 大块田滑坡形变监测分析

徐文正^{1,2}, 卢书强^{1,2}

(1. 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002;
2. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 三峡库区大块田滑坡 2021 年 7 月出现裂缝, 8 月变形加剧, 对当地居民及基础设施造成严重安全隐患, 以 2021 年 3~8 月的 9 景 Sentinel-1A 升轨 SAR 影像数据为数据源, 利用 SBAS-InSAR 技术获取滑坡在该时段内的时序形变特征, 并与同时段内的 GNSS 监测数据及地质勘查资料进行对比分析。结果表明, 大块田滑坡中后部区域变形明显, 处于蠕动变形状态; 滑坡变形迹象与 InSAR 结果有较好一致性, 验证了 SBAS-InSAR 技术在滑坡监测中的有效性; 前期累计降雨量及短时强降雨是诱发大块田滑坡发生本次变形的主要因素。研究表明, SBAS-InSAR 技术在三峡库区地质灾害监测预警领域有较为广阔的应用前景, 可为类似库区滑坡变形监测预警提供借鉴。

关键词: InSAR 技术; SBAS 时序分析; 滑坡监测; 三峡库区; 大块田滑坡

中图分类号: P237; P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)09-0147-04

1 概况

大块田滑坡位于湖北省宜昌市秭归县水田坝乡董家冲村 1 组, 紧邻董家冲村村道。大块田滑坡所处斜坡地势西南高东北低, 平均海拔千米以上, 山峰耸立, 河谷深切, 相对高差一般在 300~1 000 m 之间。坡向为 105°, 坡体自然坡度 30°~35°, 坡体植被覆盖较好, 多为橙林, 坡体局部呈阶状微地貌。滑坡全貌及主要变形区见图 1。大块田滑坡平面形态呈舌形, 剖面形态呈阶状。后缘高程约 760 m, 前缘高程 350 m, 相对高差 410 m。纵长约 860 m, 平面面积约 17.2×10⁴ m², 滑体最大厚度 12 m, 平均厚约 10 m, 滑体方量约 120×10⁴ m³, 属大型土质滑坡。大块田滑坡体物质由第四系滑坡堆积和残坡积碎石土组成, 结构较松散, 土体为粉质粘土, 黄褐色, 可塑状态, 碎石成分为石英砂岩, 块径 3~40 cm, 土石比为 7:3, 下覆基岩为侏罗系中统沙溪庙组石英砂岩, 滑体厚 5~15 m。滑坡工程地质剖面见图 2。为分析大

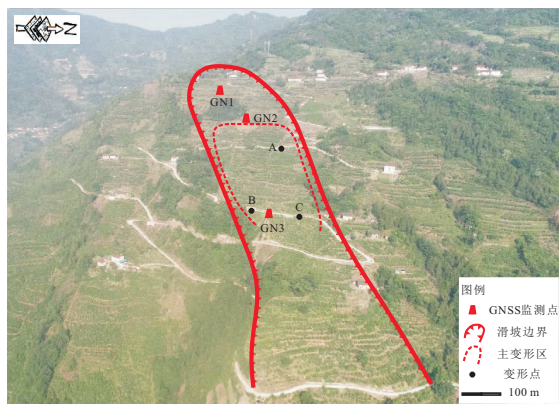


图 1 大块田滑坡全貌及主要变形区

Fig. 1 Overall view of Dakuaitian landslide and main deformation area

块田滑坡变形情况, 利用 2021 年 3~8 月共 9 景 Sentinel-1 影像数据基于 SBAS-InSAR 技术获取了大块田滑坡的地表形变结果, 并于 2021 年 7、8 月分别对研究区进行实地勘探, 结合 GNSS 监测数据与地质勘查资料对研究区形变结果进行对比分析, 验证了 InSAR 结果的有效性, 可为区域滑坡的灾害防治和监测预警提供参考。

收稿日期: 2022-11-02, **修回日期:** 2022-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172303)

作者简介: 徐文正(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为 InSAR 原理及其在地质灾害监测中的应用, E-mail: 1546145012@qq.com

通讯作者: 卢书强(1973-), 男, 博士、教授、硕导, 研究方向为地质灾害监测预警, E-mail: lsq2197@163.com

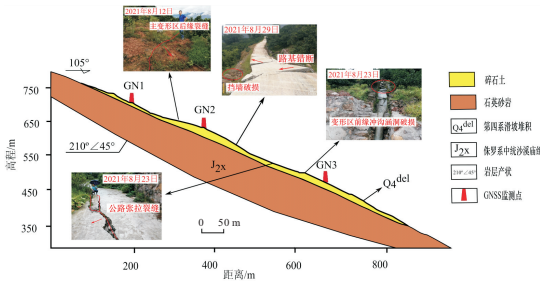


图 2 大块田滑坡工程地质剖面图

Fig. 2 Engineering geological plan of Dakuaitian landslide

2 数据与方法

2.1 数据来源

采用 9 景升轨单视复数 SAR 影像数据,该数据来自欧空局 2014 年 4 月发射的 Sentinel-1A 地球监测卫星,卫星的工作波段为 C 波段(波长 5.6 cm,频率 5.4 GHz),此波段穿透性强不易受地表植被影响,能够灵敏感知地表微小形变。研究覆盖时段为 2021 年 3~8 月,卫星重访周期为 12 d,入射角为 39.07°,观测模式为宽幅干涉(IW),可获取空间分辨率 5 m×20 m 覆盖范围 250 km×250 km 的 SAR 影像数据,极化方式为 VV 极化。同时利用欧空局发布的数字高程模型(DEM)数据 30 m 分辨率的 SRTM1 和对应的精密轨道数据校正地形相位和轨道误差。

2.2 SBAS-InSAR 基本原理

SBAS-InSAR 技术基本原理^[1]为假设卫星在研究区拍摄的 $N+1$ 幅 SAR 影像,每幅影像的成像时间依次为 t_0, t_1, \dots, t_n ,以其中一幅影像作为超级主影像与其余从影像进行配准,设定时、空基线阈值进行干涉处理得到的 M 个差分干涉对,满足:

$$(N+1)/2 \leq M \leq N(N+1)/2 \quad (1)$$

对于从 t_A 与 t_B 两时刻获取的 SAR 影像所生成的第 j 幅干涉图,像元 (x, r) 处的干涉相位满足:

$$\delta\Phi_j(x, r) = \Phi_B(x, r) - \Phi_A(x, r) \approx 4\pi[d(t_B, x, r) - d(t_A, x, r)]/\lambda + \Delta\Phi_{\text{topo}}^j(x, r) + \Delta\Phi_{\text{APS}}^j(t_A, t_B, x, r) + \Delta\Phi_{\text{noise}}^j(x, r) \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

式中, δ 为已知观测量; $\Phi_j(x, r)$ 、 $\Phi_A(x, r)$ 、 $\Phi_B(x, r)$ 分别为第 j 幅干涉图、 A 时刻、 B 时刻在像元 (x, r) 处的相位值; λ 为信号波长; $d(t_A, x, r)$ 、 $d(t_B, x, r)$ 分别为目标点在 t_A 、 t_B 时刻的雷达视线向的累积形变量; $\Delta\Phi_{\text{topo}}^j(x, r)$ 为残余地形相位; $\Delta\Phi_{\text{APS}}^j(t_A, t_B, x, r)$ 为大气效应相位; $\Delta\Phi_{\text{noise}}^j(x, r)$ 为去相干噪声。

去除地形及大气相位后,式(2)可表示为:

$$\delta\Phi_j(x, r) = \Phi_B(x, r) - \Phi_A(x, r) \approx 4\pi[d(t_B, x, r) - d(t_A, x, r)]/\lambda \quad (3)$$

将式(3)中的相位表示为平均相位变化速度和时间的乘积:

$$v_j = (\Phi_j - \Phi_{j-1})/(t_j - t_{j-1}) \quad (4)$$

式中, v_j 为两个沉降时段的平均速度。

则第 j 幅干涉图中的干涉相位可表示为各时段相位变化速度在主、从影像获取时间间隔上的积分,其矩阵形式表示为:

$$Bv = \delta\varphi \quad (5)$$

对矩阵 B 进行奇异值分解,再对各时间段内的速度进行积分就可以获得各时间段内的地表形变量。本研究所使用的 Sentinel-1A 影像数据为单一 SAR 数据源,只能从一维方向(LOS)反映地表形变信息,无法完全表现滑坡表面真实的形变信息,因此将 LOS 向形变乘 $1/\cos\alpha$ (α 为入射角)转化为垂直向形变。

2.3 数据处理流程与处理结果

由于 Sentinel-1A 卫星在宽幅干涉模式下生成的 SAR 影像范围远远超出了本研究区范围,因此在数据导入后利用合适的 SHP 文件对 SLC 数据进行剪裁,以此减少数据量,节约数据处理时间,SBAS-InSAR 技术的数据处理流程见图 3。

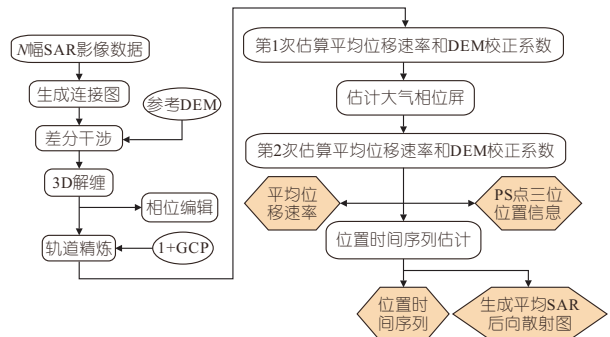


图 3 SBAS-InSAR 数据处理流程

Fig. 3 SBAS-InSAR data processing flow

InSAR 影像数据在依次经过连接图生成、干涉处理、轨道精炼和重去平、SBAS 第 1 次反演、SBAS 第 2 次反演、地理编码后,依据大块田滑坡的地质环境将 LOS 向形变和速率投影到垂直方向上,分别得到年平均形变速率和累计形变量见图 4。

3 成果验证与分析

对比分析利用大块田滑坡专业监测资料及地质勘查资料与 InSAR 结果。专业监测资料显示,GN1 监测点位移测值变化较小,GN2、GN3 监测

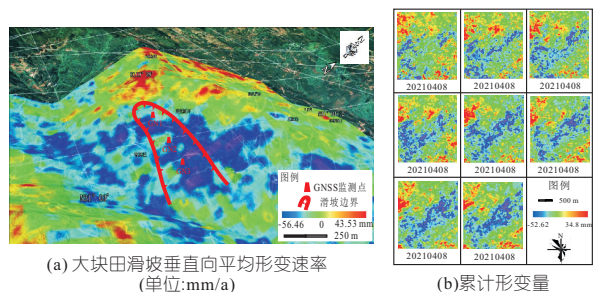


图 4 年平均形变速率和累计形变量

Fig. 4 Annual average deformation rate and cumulative deformation variation

点位测值变化较大且地形形变特征明显,因此选取 GN2、GN3 作为分析对象,结合监测数据与 InSAR 结果进行对比分析。

由图 4(a)可以看出,大块田滑坡整体表现为沉降,滑坡中后部及前缘局部的形变速率较大,最大沉降速率达 -38.41 mm/a ,对这两个区域分别选取两个 PS 点进行时序形变结果展示(图 5)并与 GN2、GN3 专业监测数据展开对比分析,从图 5 中可以看出在 2021 年 6 月中旬至 8 月底,两个区域的形变幅度较大,累计沉降量最高分别达 -48.52 、 -31.61 mm 。

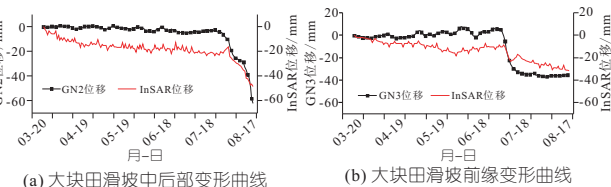


图 5 大块田滑坡中后部、前缘 InSAR 与 GNSS 时序变形曲线

Fig. 5 InSAR and GNSS time-series deformation curves of the middle and rear parts and leading edge of Dakuaitian landslide

利用皮尔逊相关系数法对 GNSS 监测数据与 InSAR 结果进行相关性分析, Pearson 相关系数分别为 0.8694 、 0.8486 ,显著性水平 P 值均小于 0.0001 ,证明二者之间具有高度相关关系,两个变量结果之间存在显著线性关联。

由大块田滑坡中后部、前缘 InSAR 与 GNSS 时序变形曲线得到 GNSS 与 InSAR 累计形变量及差值见表 1。

表 1 GNSS 与 InSAR 累计形变量及差值

Tab. 1 GNSS and InSAR cumulative shape variables and differences

测点	GNSS	SBAS-InSAR	形变量差值
	形变量/mm	形变量/mm	
GN2	-62.1	-48.52	13.58
GN3	-37.2	-31.61	5.59

由表 1 并结合相关性分析可知, SBAS-InSAR 结果与 GNSS 观测结果存在偏差, GN2 监

测点偏差为 13.58 mm , GN3 监测点偏差为 5.59 mm ,说明基于 Sentinel-1 数据的 SBAS-InSAR 技术在本研究区的整体精度达到了厘米级。

此结果与地质调查结果(图 6)具有较好一致性。7 月,滑坡前缘公路产生拉裂缝,该部位位于 GN3 监测点下方约 30 m 处。GN3 上部约 5 m 处村道,与滑坡两侧边界交汇处,路面产生明显裂缝,右侧裂缝宽 $3 \sim 10 \text{ cm}$,左侧公路裂缝 $1 \sim 3 \text{ cm}$ 。滑坡上部公路(位于监测基点下方)与滑坡两侧交汇处,路面拉裂。



图 6 滑坡公路开裂情况

Fig. 6 Landslide road cracking

由图 5(b)可以看出, 2021 年 4~6 月大块田滑坡累计形变量增长缓慢,变形趋势稳定; 2021 年 7~8 月,累计形变量增长较快,最大累计形变量达 -52.6 mm ,同时年平均位移动速率波动剧烈。结合 GNSS 监测数据(图 7)进行结果对比,由图 7 可以看出,在 I、II 阶段 GN2、GN3 的位移变化均呈明显下降趋势且幅度较大,最大累计位移量分别达 -62.1 、 -37.2 mm ,由此可知 InSAR 与 GNSS 的变形结果较为吻合。

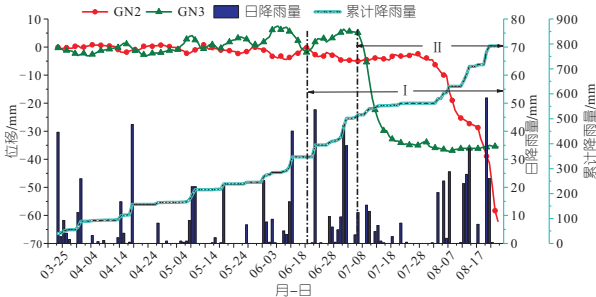


图 7 大块田滑坡 GN2、GN3 位移变化曲线

Fig. 7 Displacement variation curves of GN2 and GN3 of the Dakuaitian landslide

滑坡的发生与滑坡体所处的地质环境、降雨等因素密切相关。结合 InSAR 与 GNSS 的变形监测数据不难看出,前期累计降雨量的增加致使大块田滑坡中后部区域变形加剧。地质调查资料显示,7 月 1~8 日,累积降雨量达 85.2 mm (其中 7 月 6~8 日三天降雨量达 70.2 mm),导致 GN3

监测点垂直位移值自 7 月 7 日开始明显加速降低;8 月 9~13 日,累积降雨量达 112.6 mm(其中 8 月 9 日降雨量达 52.4 mm),导致 GN2 和 GN3 监测点垂直位移值进一步降低;8 月 20~26 日,累积降雨量达 113.0 mm(其中 8 月 26 日降雨量达 58.0 mm),致使 GN2 和 GN3 监测点垂直位移值再次降低。主要变形区 A、B、C 处路面出现多条裂缝,路基错断明显,水泥路面外侧下沉,内侧翘起,公路外侧挡土墙破损倒塌(图 8)。



图 8 主要变形区 A、B、C 处路面变形情况

Fig. 8 Deformation of pavement at major deformation areas A, B and C

由此可见,前期累计降雨量及短时强降雨是导致大块田滑坡变形的主要因素。大块田滑坡坡度较陡,坡体稳定性差,降雨后地表水入渗到地下,导致坡体物质重度增加,抗剪强度减小,坡体稳定性降低,诱发坡体发生变形^[2-4]。

Analysis of Dakuaitian Landslide Deformation Monitoring in Three Gorges Reservoir Area Based on SBAS-InSAR Technology

XU Wen-zheng^{1,2}, LU Shu-qiang^{1,2}

(1. National Field Observation and Research Station of Landslides in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, Yichang 443002, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang 443002, China)

Abstract: Aiming at the Dakuaitian landslide in the Three Gorges reservoir area, which appeared cracks in July 2021 and intensified deformation in August, causing serious safety hazards to local villagers and infrastructure, 9-view Sentinel-1A uplift SAR image data from March 2021 to August 2021 were used as data sources to obtain the time-series deformation characteristics of the landslide in this time period by using SBAS-InSAR technology, and compared with the concurrent GNSS monitoring and geological exploration data. The results show that the deformation of the middle and rear part of the landslide is obvious and is in the state of creeping deformation; The signs of landslide deformation are in good agreement with the InSAR results, which verifies the effectiveness of SBAS-InSAR technology in landslide monitoring; The accumulated rainfall in the previous period and the short-time intense rainfall are the main factors that induce the current deformation of Dakuaitian landslide. This study shows that the SBAS-InSAR technology has a broader application prospect in the field of geological disaster monitoring and early warning in the Three Gorges reservoir area, and provides a reference for similar reservoir area landslide deformation monitoring and early warning.

Key words: InSAR technology; SBAS time series analysis; landslide monitoring; Three Gorges Reservoir Area; Dakuaitian landslide

4 结 论

a. 大块田滑坡区变形以中后部区域变形为主,滑坡前缘局部变形明显,滑坡体中后部区域处于蠕变变形状态。

b. InSAR 结果与 GNSS 监测数据及地质勘查资料所反映出的滑坡实际变形情况基本一致,二者之间呈显著线性、高度相关关系,形变量的最大差值为 13.58 mm,与 GNSS 的监测精度在同一量级,表明 InSAR 结果具有可靠性,同时也说明 SBAS-InSAR 技术适用于滑坡的动态监测。

c. 通过 InSAR 与 GNSS 的对比分析并结合大块田滑坡的成因机理及地质调查资料,表明前期累计降雨量及短时强降雨是坡体发生本次形变的主要诱发因素。

参 考 文 献:

[1] 朱建军,李志伟,胡俊. InSAR 变形监测方法与研究进展 [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1717-1733.
 [2] 殷坤龙,汪洋,唐仲华. 降雨对滑坡的作用机理及动态模拟研究 [J]. 地质科技情报, 2002, 21(1): 75-78.
 [3] 郁舒阳,张继勋,任旭华,等. 降雨类型对浅层深层滑坡渗流及稳定性的影响 [J]. 水电能源科学, 2018, 36(3): 123-127.
 [4] 宁万辉,宁健,俞美华,等. 降雨对碎石土边坡稳定性的影响分析 [J]. 水电能源科学, 2011, 29(1): 83-84, 178.