

冯文凯, 顿佳伟, 易小宇, 等. 2020. 基于 SBAS-InSAR 技术的金沙江流域沃达村巨型老滑坡形变分析[J]. 工程地质学报, 28(2): 384-393. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2019-411

Feng Wenkai, Dun Jiawei, Yi Xiaoyu, et al. 2020. Deformation analysis of Woda village old landslide in Jinsha river basin using SBAS-InSAR technology[J]. Journal of Engineering Geology, 28(2): 384-393. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2019-411

基于 SBAS-InSAR 技术的金沙江流域沃达村巨型老滑坡形变分析*

冯文凯 顿佳伟 易小宇 张国强

(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059, 中国)

摘要 近年来突发性高位滑坡灾害日益频发, 造成恶劣影响。这类地质灾害调查难度大、隐蔽性强, 单靠群测群防和地质调查难以解决灾害的防治问题。随着雷达遥感卫星数据质量的不断提升, 合成孔径干涉雷达测量(InSAR)中的 SBAS-InSAR 技术为特大型老滑坡灾前形变探测提供了新的技术途径。利用 SBAS-InSAR 技术对金沙江流域沃达村滑坡进行地表形变监测, 获取了 2017 年 3 月 30 日至 2019 年 9 月 28 日内的形变结果, 划定了强烈形变区(I_{雷达})、均匀形变区(II_{雷达}), 分析了滑坡复活区整体和局部滑塌地表形变速率、累积位移变化趋势和主裂缝形变情况。同时实地进行了工程地质调查和复核, 发现老滑坡复活区变形迹象与 SBAS-InSAR 技术解译成果有着较好的一致性。表明 SBAS-InSAR 技术在复杂山区地质灾害监测预警领域有较为广阔的应用前景, 为类似老滑坡监测预警提供了新的思路与借鉴。

关键词 沃达村; 老滑坡; SBAS-InSAR; 形变分析; 复核验证

中图分类号: P642.22 文献标识码: A doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2019-411

DEFORMATION ANALYSIS OF WODA VILLAGE OLD LANDSLIDE IN JINSHA RIVER BASIN USING SBAS-INSAR TECHNOLOGY

FENG Wenkai DUN Jiawei YI Xiaoyu ZHANG Guoqiang

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract In recent years, unexpected high-level landslides have been increasing, resulting in adverse effects. This kind of geological hazard investigation is very difficult and concealed. It is difficult to solve the problem of disaster prevention and control by group survey and geological investigation alone. With the continuous improvement of the quality of radar remote sensing satellite data, the SBAS-InSAR technology in synthetic aperture Interferometric Radar(InSAR) provides a new technical approach for deformation detection of large-scale old landslides before disaster. The surface deformation of Wodacun landslide in Jinsha River Basin is monitored by

* 收稿日期: 2019-10-08; 修回日期: 2019-12-27.

基金项目: 国家自然科学基金(资助号: 41977252) 四川省青年科技创新研究团队专项计划项目(资助号: 2017TD0018) 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室团队项目(资助号: SKLGP2016Z001)。

This study is supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No.41977252), the Sichuan Provincial Youth Science and Technology Innovation Team Special Projects of China(Grant No.2017TD0018) and the Team Project of Independent Research of SKLGP (Grant No. SKLGP2016Z001)。

第一作者简介: 冯文凯(1974-) 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事区域稳定及与岩体稳定以及地质灾害评价与防治方面的教学与研究工作。E-mail: fengwenkai@cdu.cn

SBAS-InSAR technology. The deformation results from March 30, 2017 to September 28, 2019 are obtained. Strong deformation area (I_{radar}) and uniform deformation area (II_{radar}) are delineated. The surface deformation rate, cumulative displacement trend and main crack deformation of the whole and local landslide in the revived area are analyzed. At the same time, the engineering geological survey and review are carried out on the spot. It is found that the resurrection and deformation signs of the old landslide are in good agreement with the interpretation results of the SBAS-InSAR technology. It is clear that the SBAS-InSAR technology has broad application prospects in the field of early warning and monitoring of geological disasters in complex mountain areas, and provides new ideas and references for monitoring and early warning similar to old landslides.

Key words Woda village; Old landslide; SBAS-InSAR; Deformation analysis; Verification

0 引言

随着人类活动深度和广度的日益加深和拓展,我国西部地区大型突发地质灾害日益频发。这些灾害表现出隐蔽性强、危害性高,具有显著的突发性,严重影响了社会经济发展和人民安居乐业,给地质灾害防治与地质环境保护带来了巨大挑战。

2017年6月24日清晨6时许,四川省茂县叠溪镇新磨村新村组后山约 $450 \times 10^4 \text{ m}^3$ 山体突发顺层高位滑动,造成80余人失踪或遇难,引起国内外广泛关注(许强等,2017)。灾害发生后,意大利 Tre Altamira (2017) 通过 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达干涉) 技术对 2014 年以来 45 景 Sentinel-1 雷达卫星影像进行了分析,证实新磨村滑坡的显著形变主要发生在滑前的数月之内。2018年10月11日凌晨4时许,金沙江流域西藏昌都市江达县波罗乡白格村发生特大库岸岩质滑坡,总方量约 $3165 \times 10^4 \text{ m}^3$,滑坡体迅速阻断金沙江,回水造成多条道路中断,川藏滇等地紧急转移安置 2.1 万余人(冯文凯等,2019)。许强等(2018)通过分析白格滑坡灾前雷达卫星数据,指出该滑坡灾害发生前一年,滑源区斜坡最大位移量约 25 m。这些案例充分说明 InSAR 技术对处于高位、交通困难、人迹罕至的隐蔽性地质灾害的识别和监测研究具有显著优势。

InSAR 技术是近 20 a 来兴起的一种新型对地观测技术,具有全天候工作、覆盖范围广、探测精度高、非接触和综合成本低等优点,已被广泛地应用于滑坡(李凌婧等,2017)、地面沉降(张静等,2018)、地裂缝(赵超英等,2011)等地质灾害的形变监测。InSAR 技术中的小基线 (Small Baseline Subsets, SBAS) 技术具有获取微小形变信息和长时间序列缓慢地表变形的优势(莫玉娟等,2018),在复杂山区

地质灾害预警和监测领域有较为广阔的应用前景。在基于 SBAS-InSAR 技术对滑坡早期识别与形变监测的研究领域中,很多学者取得了相应的实质性成果。余睿(2014)采用 SBAS-InSAR 技术对甘肃省西和县慢速型滑坡进行全局和局部的监测,揭示了影响西和县滑坡体移动的主导因素;刘筱怡等(2017)以鲜河水断裂带内蠕滑型滑坡为研究对象,采用 SBAS-InSAR 技术获取蠕滑型滑坡时间序列形变特征,分析其发展变化规律,对鲜水河断裂带以及类似构造活动地区的地质灾害防治起到了重要作用;聂兵其等(2018)基于 SBAS-InSAR 技术对丹巴县城进行滑坡形变探测及隐患识别,验证了 InSAR 监测结果与现场调查的一致性。可以说,SBAS-InSAR 技术为地质灾害隐患点的普查和分析研究提供了重要支撑。在充分利用星载雷达对地观测技术的前提下,开展针对性的工程地质调查和复核工作,一方面有利于正确认识 InSAR 解译数据的规律性,另一方面也有利于灾害预警研判的准确性,从而大大提升我国科学防灾减灾的技术实力。

沃达村巨型老滑坡是区域地质灾害调查隐患数据库的隐患点,位于江达县岩比乡沃达村、金沙江右岸,距离白格滑坡直线距离 42 km。本文在搜集沃达村老滑坡区域升轨哨兵一号 (Sentinel-1A) 2017 年 3 月 30 日至 2019 年 9 月 28 日的 39 景数据的基础上,采用 SBAS-InSAR 技术分析了老滑坡堆积体的形变特征,并进一步针对性地开展了现场工程地质调查和复核工作,在此基础上分析了 SBAS-InSAR 技术在复杂山区地质灾害预警和监测领域的适用性,为类似老滑坡监测预警提供了新的思路与借鉴。

1 沃达村老滑坡概况

沃达村老滑坡位于西藏自治区昌都市江达县岩

比乡沃达村 坐标东经 E93°26′06″、北纬 N31°26′06″ (图 1)。前期区域地质灾害调查表明,该地段地质历史时期曾发生滑坡灾害,其滑坡堆积体在降水、地震和水位波动情况下易发生复活,应对其重点监测研究。

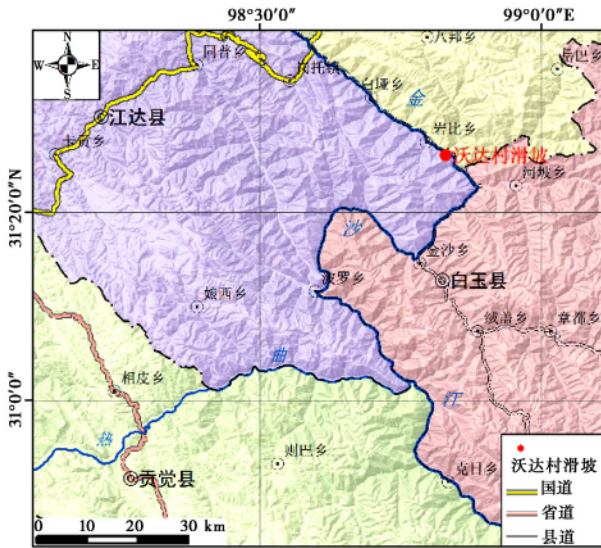


图 1 滑坡地理位置图

Fig. 1 Geographic location map of the landslide

从综合光学遥感解译图(图 2)分析,老滑坡体纵长约 1.9 km,横宽约 1.7 km,主滑方向为 NE30°;老滑坡堆积体局部复活,复活部分纵向长约 0.88 km,横宽约 1.08 km,面积约 0.925 km²。滑坡体平面形态为半圆状,前缘呈由缓变陡的陡崖形态,缓部与江面高差最大约 240 m,前端临空面陡倾,坡脚即为金沙江河谷,高程约 2950 m,中后部相对平缓。据前期调查显示,该老滑坡上部覆盖层为第四系滑坡堆积物,含碎石、砾石黏性土,厚约 20~30 m,下伏基岩为变质页岩,岩层产状约为 240°∠80°。

2 SAR 数据获取及处理方法

2.1 数据选取及覆盖概况

本文使用的单视复数 SAR 影像数据来自欧空局(European Space Agency)2014年4月3日发射的对地观测卫星 Sentinel 1A,数据覆盖区域如图 3 所示。波段为 C 波段,所用影像为合成孔径雷达 99 轨道数据,时间跨度从 2017 年 3 月 30 日至 2019 年 9 月 28 日,24 d 一景,共 39 景,轨道方向为升轨,成像中心入射角为 36.2°,成像模式为 IW 宽幅模式,地面分辨率为 5 m×20 m,幅宽为 250 km×250 km,极

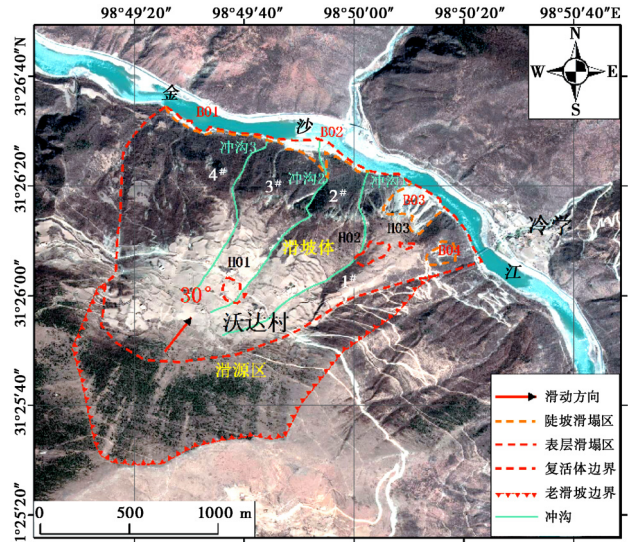


图 2 综合光学遥感解译图

Fig. 2 Integrated optical remote sensing interpretation map

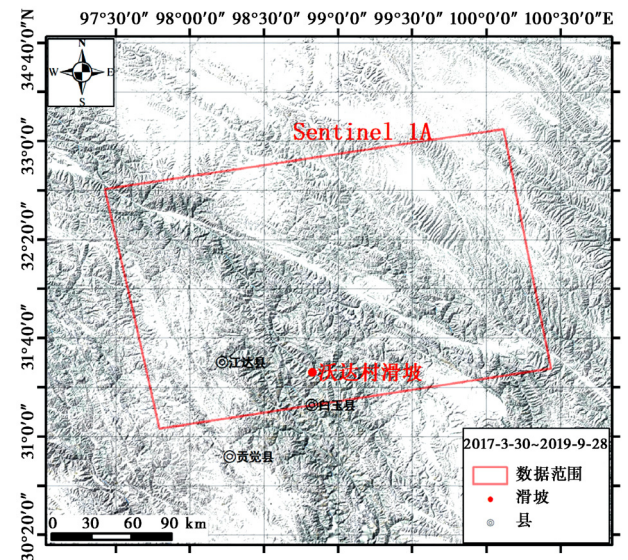


图 3 数据覆盖范围图

Fig. 3 Data coverage chart

化方式为 VV,方位向和距离向采样间距分别为 2.329 m、13.956 m(表 1)。本研究采用了日本 JAXA 提供的 30 m 分辨率 ALOS World 3D (AW3D30) DEM 作为外部数据来消除地形相位的影响。

2.2 技术原理与形变速率获取

2.2.1 SBAS-InSAR 技术原理

为减少时间和空间去相干, Berardino et al. (2002) 在 Casu(2000) 研究的基础上,提出了短基线差分干涉法。该方法的基本原理是利用具有较短时-空基线的影像对产生干涉图提高相干性,再进

表 1 沃达村滑坡 Sentinel 1A 数据列表

Table 1 Data list of sentinel 1 in Dawo Village landslide

序号	成像时间	成像模式	极化方式	累积时间基线 /d	累积空间基线 /m
1	20170330	IW	VV	0	0
2	20170423	IW	VV	24	-46.119
3	20170517	IW	VV	48	-50.186
4	20170610	IW	VV	72	77.826
5	20170704	IW	VV	96	40.558
6	20170809	IW	VV	132	-10.291
7	20170902	IW	VV	156	-39.573
8	20170926	IW	VV	180	-50.931
9	20171020	IW	VV	204	114.923
10	20171113	IW	VV	228	-24.411
11	20171207	IW	VV	252	50.346
12	20171231	IW	VV	276	63.293
13	20180124	IW	VV	300	-165.698
14	20180217	IW	VV	324	27.433
15	20180313	IW	VV	348	30.264
16	20180406	IW	VV	372	-6.096
17	20180430	IW	VV	396	23.623
18	20180524	IW	VV	420	-147.052
19	20180617	IW	VV	444	116.508
20	20180711	IW	VV	468	43.829
21	20180723	IW	VV	492	-86.624
22	20180816	IW	VV	516	-15.263
23	20180909	IW	VV	540	64.119
24	20181003	IW	VV	564	-43.180
25	20181027	IW	VV	588	35.953
26	20181120	IW	VV	612	26.433
27	20181214	IW	VV	636	-18.007
28	20190107	IW	VV	660	31.303
29	20190131	IW	VV	684	-57.897
30	20190224	IW	VV	708	-62.838
31	20190320	IW	VV	732	61.137
32	20190413	IW	VV	756	-40.041
33	20190507	IW	VV	780	81.387
34	20190531	IW	VV	804	-93.348
35	20190624	IW	VV	828	27.419
36	20190718	IW	VV	852	18.360
37	20190811	IW	VV	876	-105.069
38	20190904	IW	VV	900	36.953
39	20190928	IW	VV	924	41.097

行解缠干涉相位。依据相干像元相位和观测时间的关系,采用奇异值分解方法将多个小基线集合数据联合起来求解(许军强等,2019),有效地解决了各数据集之间空间基线过长造成的时间不连续问题,

提高了监测的时间分辨率,从而求得影像序列间地表形变速率的最小范数最小二乘解(何秀凤等,2012)。

其基本原理:假设有 $N+1$ 景单视复数影像,其成像时间为 (t_0, t_1, \dots, t_n) , 设某一差分解缠图为 j , 某像元 (x, r) 对应的解缠相位可表示为式(1):

$$\delta\varphi_j(x, r) = \varphi(t_B, x, r) - \varphi(t_A, x, r) \approx \delta\varphi_j^{\text{topo}}(x, r) + \delta\varphi_j^{\text{disp}}(x, r) + \delta\varphi_j^{\text{atm}}(x, r) + \delta\varphi_j^{\text{noise}}(x, r) \quad (1)$$

式中, $\delta\varphi_j^{\text{topo}}(x, r)$ 为 DEM 误差所形成的相位; $\delta\varphi_j^{\text{disp}}(x, r)$ 为坡体形变产生的相位; $\delta\varphi_j^{\text{atm}}(x, r)$ 为在 t_B 与 t_A 时刻间大气影响产生的相位; $\delta\varphi_j^{\text{noise}}(x, r)$ 为噪声导致的相位,式(1)右端前 3 项可表示为式(2):

$$\begin{cases} \delta\varphi_j^{\text{topo}}(x, r) = \frac{4\pi B_{\perp j} \Delta Z}{\lambda R \sin\theta} \\ \delta\varphi_j^{\text{disp}}(x, r) = \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, x, r) - d(t_A, x, r)] \quad \forall j=1, \dots, M \\ \delta\varphi_j^{\text{atm}}(x, r) = \varphi_{\text{atm}}(t_B, x, r) - \varphi_{\text{atm}}(t_A, x, r) \end{cases} \quad (2)$$

式中 λ 为波长; θ 为雷达视角; Δz 为 DEM 误差; R 为雷达距观测物的斜距; $d(t_B, x, r)$ 和 $d(t_A, x, r)$ 分别表示相对于参考时间 t_0 的视向累积变形量。 M 为干涉图数量。假定 N 代表全部 SAR 影像数,则有 $\frac{M}{2} \leq M \leq \frac{N(N-1)}{2}$, 对 M 个解缠相位进行最小二乘或奇异值分解,即:

由于在处理过程中产生 M 幅干涉图,根据式(2)可得 M 个方程,以矩阵形式表示为式(3):

$$\delta\varphi(x, r) = A\varphi(x, r) \quad (3)$$

其中 A 为 $M \times N$ 系数矩阵; $\varphi(x, r)$ 为 (x, r) 点在 N 个时刻对应的未知形变相位构成的矩阵,当 $M \geq N$ 时,通过最小二乘法得出式(4):

$$\varphi(x, r) = (A^T A)^{-1} A^T \delta\varphi(x, r) \quad (4)$$

当 $M < N$ 时,方程有无数解,使用 SVD 方法联合求解多个小基线,最终可得到不同时刻所对应的累积形变量。

2.2.2 视向形变速率获取

本文使用 ENVI 中 SArscape 模块,用 SBAS 算法对 Sentinel 1A 数据进行干涉处理,共生成 109 个干涉对,时间基线为 75 d,临界基线百分比为 2%,各像对时间基线和空间基线的连接方式如图 4 和图 5 所示,图中绿色的点代表 39 景影像的成像时间,黄色点代表作为参考主影像的成像时间。对合成的干涉图做第 1 次反演、第 2 次反演、地理编码以及栅矢

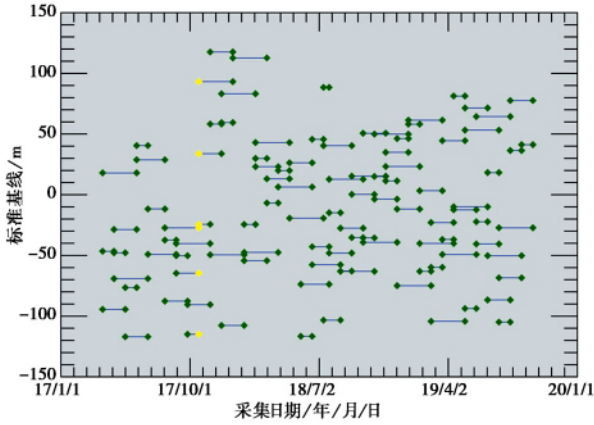


图 4 影像时间基线

Fig. 4 Image time baseline

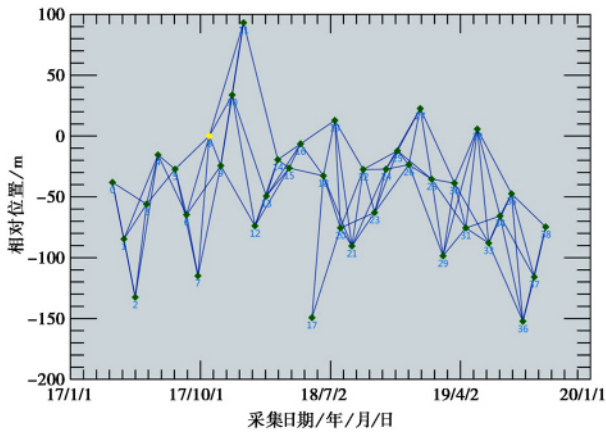


图 5 影像空间基线

Fig. 5 Image spatial baseline

转换,生成地表沿雷达视向的平均形变速率 ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$),最终得到时间序列上的形变结果。具体处理流程如图 6 所示。

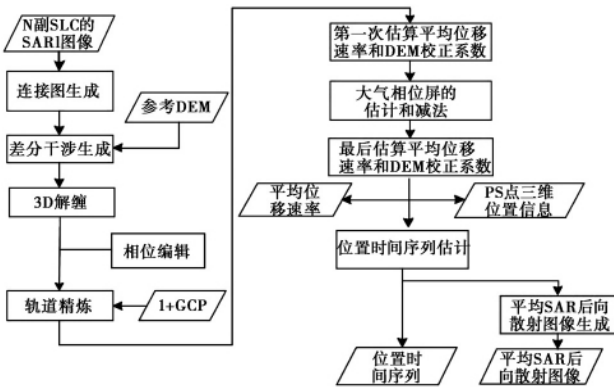


图 6 SBAS 处理流程

Fig. 6 SBAS-InSAR processing flow

2.2.3 二维形变转换

由于滑坡多沿斜坡面进行滑动,雷达视线方向的形变信息无法准确反映斜坡面的真实形变情况

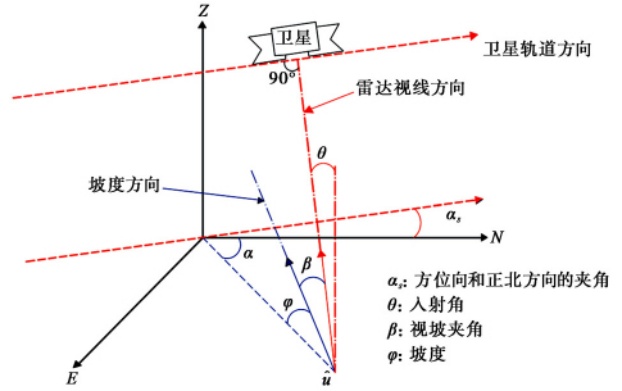


图 7 雷达视线方向和坡度方向几何示意图

(Cascini et al. , 2010)

Fig. 7 Geometric sketches of radar line-of-sight direction and slope direction(Cascini et al. , 2010)

(戴可人等,2019)考虑雷达视线方向、坡度方向和垂直沉降方向的几何关系(图7),假设运动沿单位矢量 \hat{u} 指定的方向发生,采用式(5)、式(6)(Cascini et al.,2010)和式(8)(Colesanti et al.,2006)将视线方向的形变速率转化为坡度方向和垂直方向的形变速率。

$$\hat{u} = \begin{bmatrix} -\sin\alpha\cos\varphi \\ -\cos\alpha\cos\varphi \\ \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$V_{\text{Slope}} = V_{\text{Los}} / \cos\beta \quad (6)$$

式(6)中 $\cos\beta$ 可用式(7)(Cascini et al.,2010)计算;

$$\cos\beta = \begin{bmatrix} (-\sin\alpha\cos\varphi)(-\sin\theta\cos\alpha_s) + \\ (-\cos\alpha\cos\varphi)(\sin\theta\sin\alpha_s) + \\ \sin\varphi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$V_u = \frac{V_{\text{Los}} + V_{\text{Slope}}\sin\theta\cos\left[\delta - \left(\alpha_s - \frac{3}{2}\pi\right)\right]}{\cos\theta} \quad (8)$$

其中, V_{Slope} 代表沿坡度方向的形变速率; V_{Los} 代表沿雷达视线方向的形变速率; V_u 代表垂直方向的形变速率; α_s 为方位向和正北方向的夹角; $\alpha_s - \frac{3}{2}\pi$ 为方位向视线方向; δ 为滑坡方位角; α 为斜坡坡向; β 为视坡夹角; θ 为入射角; φ 为斜坡坡度。

避免在 V_{Los} 向 V_{Slope} 转换过程中存在绝对值的极大异常现象,采用 Herrera et al.(2013)提出 $\cos\beta = \pm 0.3$ 为固定阈值,即 V_{Slope} 不能大于 V_{Los} 的 3.33 倍,设 $-0.3 < \cos\beta < 0$ 时, $\cos\beta = -0.3$; $0 < \cos\beta < 0.3$ 时, $\cos\beta = 0.3$ 。

3 形变结果分析

结合遥感影像分析,该滑坡中部和后缘部位表面植被覆盖密度不大,相干点较多,干涉效果较好,有较明显的速率积累,滑坡部分地方植被覆盖茂密,造成影像的失相干,速率点较为稀少。

形变速率为负值表示形变点向远离卫星传感器方向运动,正值表示形变点向靠近卫星传感器方向运动。由 InSAR 视向形变分析结果可见,图 8 中形变值均为负值,表明滑坡整体向着金沙江方向向下滑动,符合滑坡体的运动规律。从图 8 中可以看出该滑坡形变较强部位位于滑坡中部和中前缘(图 8 紫色虚线圈内),其中紫色虚线圈内的红色区域形变量最大,形变速率 $\geq 80 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

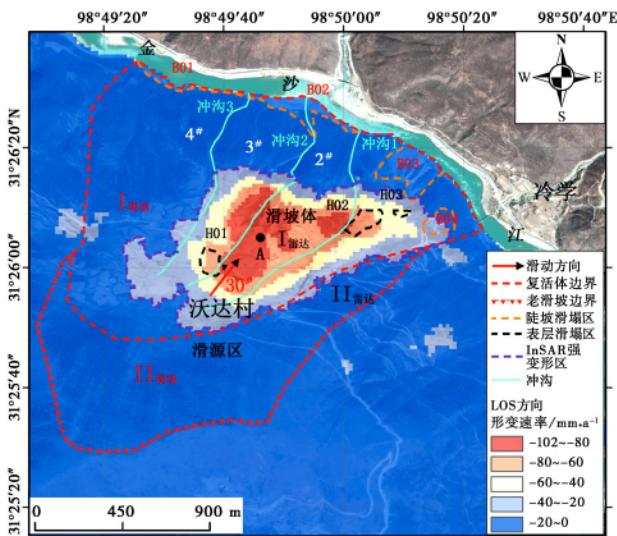


图 8 2017 年 3 月~2019 年 9 月形变速率图(LOS 方向)
Fig. 8 Deformation rate map from March 2017 to September 2019(LOS Direction)

沃达村滑坡沿坡向年平均速率(V_{Slope})和垂直方向年平均速率(V_{V})分别如图 9、图 10 所示,解译出的强变形区与 LOS 方向大致一致,但在形变速率量值上存在较大差异,沿坡向形变速率最大。

4 实地工程地质调查与复核

为复核解译数据,开展了实地工程地质调查与复核工作。经实地踏勘,滑坡体前缘地形陡峭;中前部坡度较大,树木生长茂盛;中部为缓坡平台,主要为耕地,树木零星生长;后部为古滑坡滑源区(图 11a)。受冲沟下切侵蚀及前缘陡倾临空面综合作

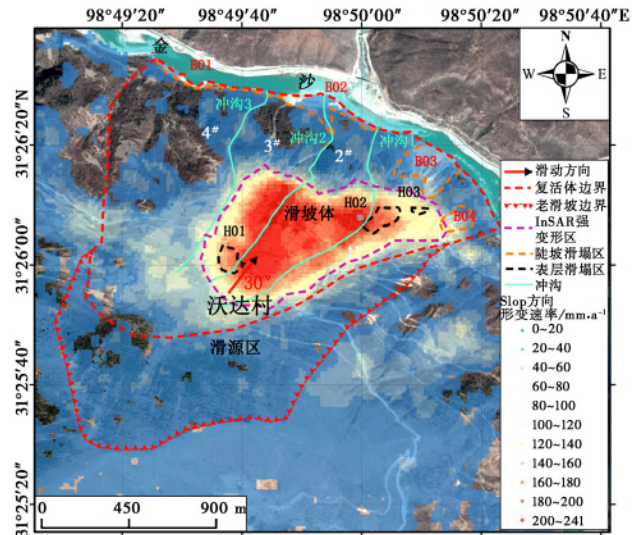


图 9 2017 年 3 月~2019 年 9 月形变速率图(Slope 方向)
Fig. 9 Deformation rate map from March 2017 to September 2019(Slope Direction)

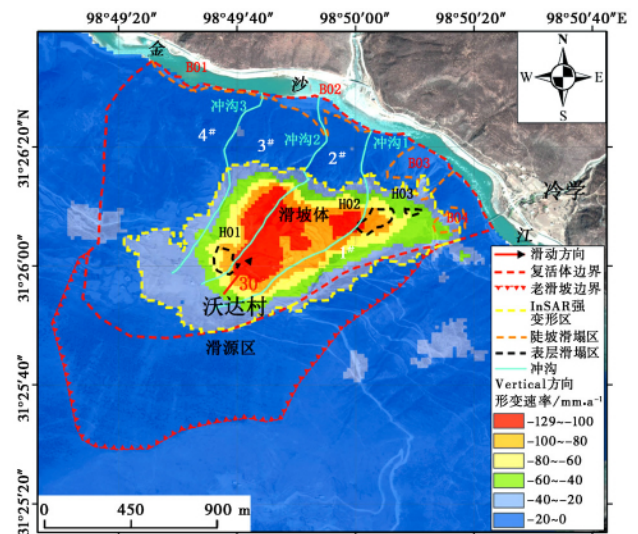


图 10 2017 年 3 月~2019 年 9 月形变速率图(Vertical 方向)
Fig. 10 Deformation rate map from March 2017 to September 2019(Vertical Direction)

用,滑坡前缘发育多处向冲沟、临空面方向的崩滑变形体(B01~B04),崩滑变形体表部裂缝横张、错坎发育,裂缝张开 2~10 cm,最大错距 1~2 m,前端陡崖可见明显基覆界面(图 11b)。滑坡复活区中部发育多处小型滑动变形体(H01~H03),坡体发育横切梯级陡坎,高度几十厘米到几米不等,延伸几十米到数百米不等,陡坎上部多耕作,有灌木丛生,表明陡坎形成时间较长(图 11c);可见明显马刀树,结合树龄推测稳定时间至少 10 a 以上(图 11d)。

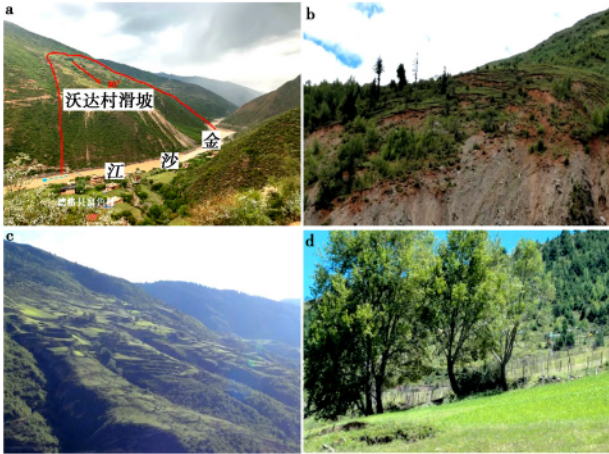


图 11 沃达村老滑坡照片

Fig. 11 Photographs of the old landslide in Woda Village

4.1 滑坡整体变形与形变速率对比分析

复活区主要位于老滑坡体中下部,强烈变形区($I_{现场}$)后缘位于老滑坡后缘陡缓交界处,两侧边界依地形延伸至老滑坡边界(图 8),其内裂缝、下错台坎、局部滑塌现象明显。现场的变形迹象与 SBAS-InSAR 方法获取的形变速率图(图 8)特征有着较高的一致性。在滑坡视向形变速率图(图 8)形变量较大的红色区域取一点 A 作出该点历史累积位移形变曲线,与搜集的 2017 年 1 月~2019 年 8 月月累计降雨曲线对比分析(图 12):随着 2017-05~2017-06、2018-05~2018-08、2019-06~2019-07 3 个不同时间段内降雨量急剧增加,A 点形变量明显加速;降雨量较小的时间段内,A 点形变量增加变缓,形变趋势与降雨具有较好的响应规律。据现场调查,滑坡所处金沙江水位波动最高高程为

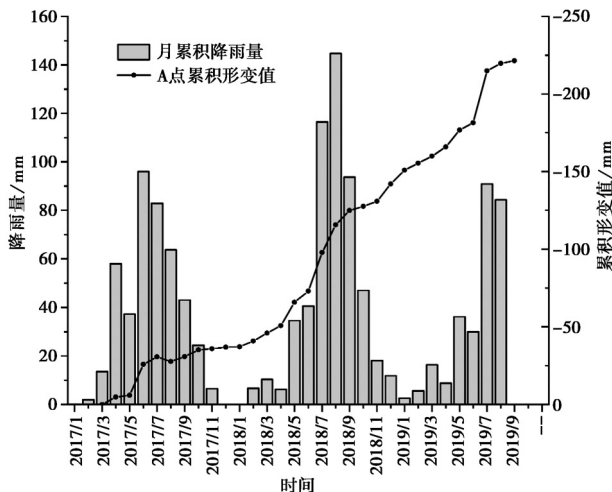


图 12 InSAR 时序形变与降雨响应

Fig. 12 InSAR time series deformation and rainfall response

2930~2950 m,而滑坡局部复活区位置位于 3220~3580 m,远离金沙江水位波动影响区。说明该滑坡中前部复活区主要受降雨影响,为老滑坡降雨复活型滑坡。

从滑坡视向形变速率(图 8)分析,坡体中部(紫色虚线圈闭范围内)灰色($-40 \sim -20 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$)、黄色($-60 \sim -40 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$)、橙色($-80 \sim -60 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$)、红色($-102 \sim -80 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$)等颜色相互交错,分布杂乱,差异性很大,说明该区域变形强烈是滑坡体裂缝台坎发育的体现。滑坡区前缘、后缘雷达形变速率颜色为单一蓝色($-20 \sim 0 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$),故在雷达监测时间段,该区域形变较小,差异变形不明显。通过以上雷达形变速率及分区分析,将形变速率整体分布趋势(图 8)分成强烈形变区($I_{雷达}$)和均匀形变区($II_{雷达}$),分析 2017 年 3 月~2019 年 9 月不同时段内沿滑坡主滑方向的视向形变速率(图 13a~图 15a),发现每年老滑坡前后缘形变量相对较小,中部的形变量较大,2017~2019 年分别最大可达约 $-125 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $-100 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $-55 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。由于坡体前缘较陡,前缘坡度与坡体整体坡度相差太大,考虑地形因素引起的叠掩和阴影造成的前缘 SAR 影像失真(张毅,2018),老滑坡前缘形变速率结果存在不确定性。综合现场调查和形变速率分析结果,认为滑坡现阶段滑动变形以向冲沟、陡倾临空面方向为主,破坏形式以前缘散落、局部滑塌为主,整体表现老滑坡局部复活的牵引式滑动,而老滑坡中前部主要堆积体覆盖区则表现为中部向前部的强烈推挤作用。

4.2 滑坡局部变形与形变速率对比分析

现场复核阶段对前缘临空面发育的 4 处崩滑变形体(B01~B04)和滑坡中、下部 3 处滑动变形体(H01~H03)进行了细致调查。4 处崩滑变形体均为表层发生的溜滑,规模较小,树木歪斜的范围位于冲沟沟口,表明为集中降雨引起的变形。3 处滑动变形体中,2 处(H02 和 H03)因为前部临空面变形导致出现牵引式滑动变形,1 处(H01)因降雨和人类工程活动因素发生牵引式滑动变形。下面主要分析滑动变形体 H01 的情况。

H01 滑动变形体位于坡体的中后部,沃达村公路左侧,滑动方向与坡向一致(图 16a)。据访,H01 滑动变形体前缘为沃达村村道,村道挡土墙于 2013 年左右发生隆起破坏(图 16b);2018 年中旬,H01 滑动变形体发生了较为强烈的变形,导致挡墙上方

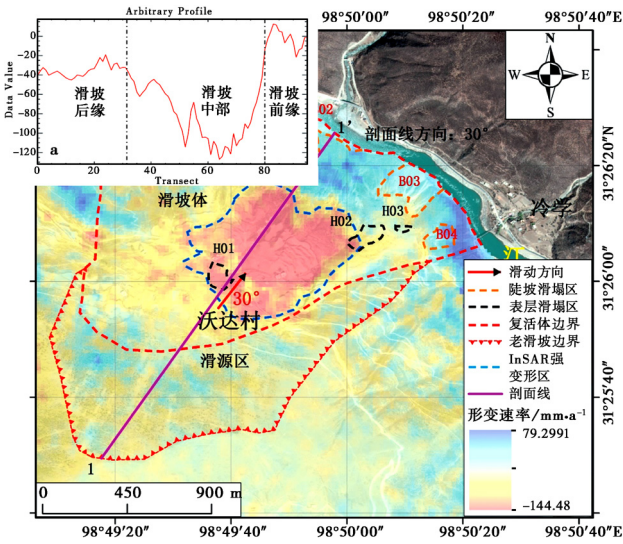


图 13 2017 年 3~12 月形变速率及剖面形变图

Fig. 13 Deformation rate and profile deformation map from March to December 2017

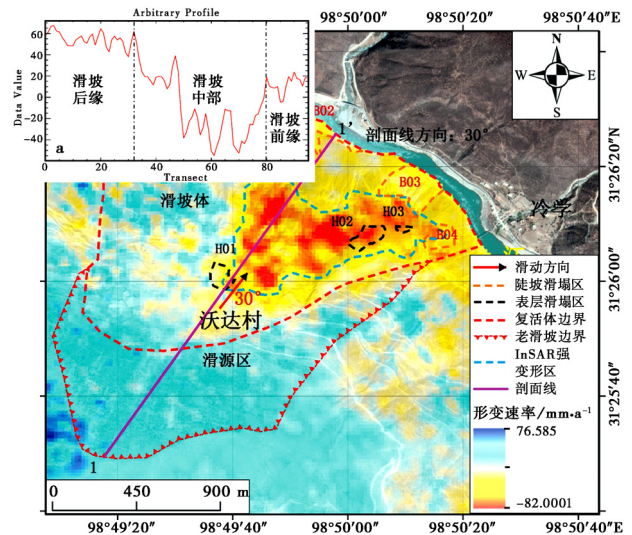


图 15 2019 年 1~9 月形变速率及剖面形变图

Fig. 15 Deformation rate and profile deformation map from January to September 2019

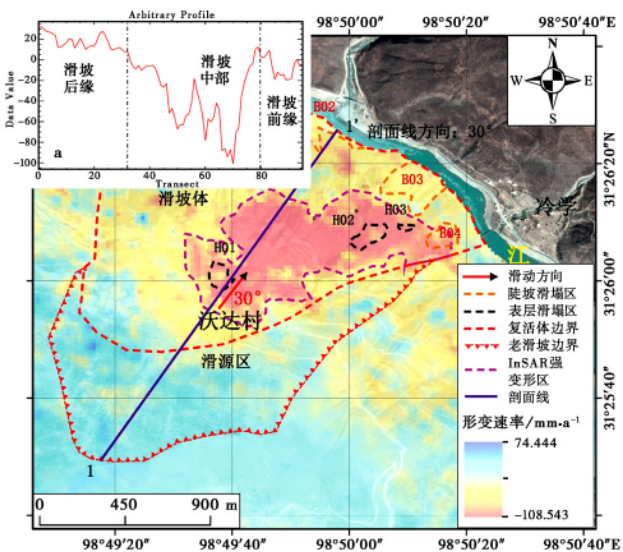


图 14 2018 年形变速率及剖面形变图

Fig. 14 Deformation rate and profile deformation map of 2018
较高处田地出现多处裂缝及下错台坎(图 16c)。调查发现,其下部紧邻的村民房屋完好无破坏,表明其仅仅是近年来表层岩土体在降雨等作用下发生的局部牵引式滑动变形。

为细致分析 H01 滑动变形体的滑动性质与雷达形变速率信号之间的相关性,沿 H01 滑动变形体主滑方向布置剖面线,并依次取 1[#]~4[#] 监测点,利用图 9 绘制其 3 年内滑坡历史累积位移形变曲线(图 16d)。如图所示,4[#] 监测点历史累积形变量较大,增加的速率也较大;1[#]~3[#] 监测点历史累积形变量增加幅度基本一致。前缘的形变速率远大于中部和后部的形变速率,说明 H01 滑动变形体属于牵引式

滑动变形。

根据对滑塌体后缘下错台坎发育处沿坡向以及垂向形变速率点的分析:沿坡向的形变速率(图 9、图 16a)颜色各异,形变速率差异性很大,形变速率 140 mm·a⁻¹、160 mm·a⁻¹、180 mm·a⁻¹ 均有分布,与裂缝形成特征吻合;沿垂向形变速率分析(图 10),在后缘位置黄色形变速率(-80~-60 mm·a⁻¹)附近出现多级的橙色形变速率(-100~-80 mm·a⁻¹),说明该区域发生多级下错沉降现象。两种现象印证了滑坡强变形区历史出现多级下错台坎,表现出蠕动变形,与地质调查的现象基本相符。

5 结论

(1) 通过对视向、坡向、垂向方向的形变速率分区以及形变点之间的差异性分析,初步将沃达村滑坡分为强烈形变区(I_{雷达})和均匀形变区(II_{雷达}),与现场判定的强烈变形区(I_{现场})和弱变形区(II_{现场})基本吻合。

(2) 根据 2017 年 3 月~2019 年 9 月 3 a 不同时段内沿滑坡主滑方向的剖面形变速率分析,后缘、前缘形变量较小,中部的形变量较大,分别最大可达约 -125 mm·a⁻¹、-100 mm·a⁻¹、-55 mm·a⁻¹(LOS)。考虑地形因素对 InSAR 前缘形变速率的影响并结合现场调查分析认为滑坡现阶段变形以向冲沟、陡倾临空面方向为主,破坏形式以前缘散落、局部滑塌为主,整体表现为老滑坡局部复活的牵引式滑动,而

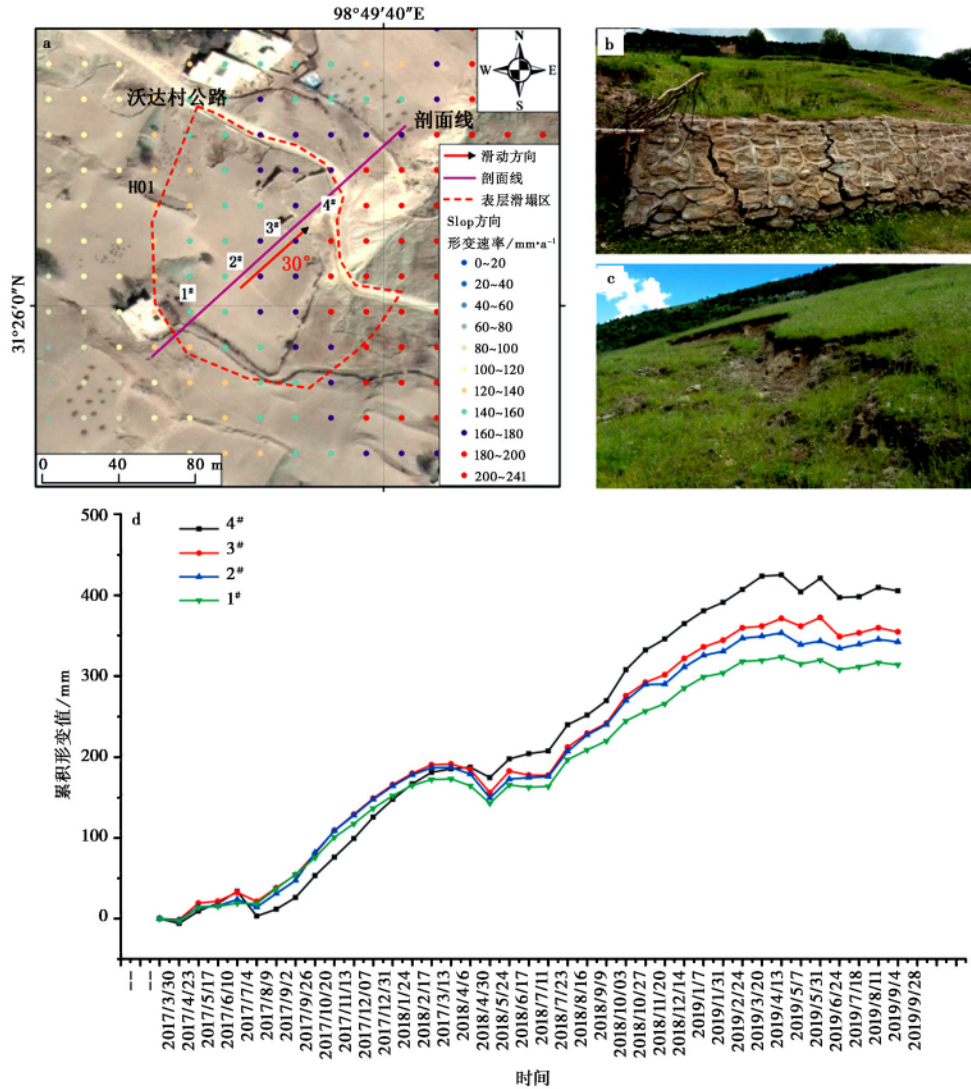


图 16 H01 变形体 SBAS-InSAR 监测与野外现象对比

Fig. 16 Comparison of SBAS-InSAR monitoring data of H01 landslide with field review

老滑坡中前部主要堆积体覆盖区则表现为中部向前缘的强烈推挤作用。

(3) 基于坡向形变速率图、垂向形变速率图中形变速率值的分布以及量值的差异性特征,初步判定了局部滑塌的性质以及多级台坎发育的位置,与野外地质调查吻合性较好。

(4) 通过 SBAS-InSAR 技术分析以及现场调查复核,发现老滑坡复活变形迹象与 SBAS-InSAR 技术解译成果有着较好的一致性,在复杂山区地质灾害预警和监测领域有较为广阔的应用前景,为类似老滑坡的监测预警提供新的思路与借鉴。

致谢 本文在完成过程中得到了中国地震局地壳应力研究所、四川省国土空间生态修复与地质灾害

防治研究院、江达县气象局等单位的帮助。欧洲太空局为本研究提供的 Sentinel-1A 数据,日本 JAXA 提供的 30 m 分辨率“ALOS World 3D—30 m” DEM。在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing 40(11): 2375-2383.
- Cascini L, Fornaro G, Peduto D. 2010. Advanced low-and full-resolution D-InSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales[J]. Engineering Geology, 112(1): 29-42.
- Casu F, Manzo M, Lanari R. 2000. A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from D-

- InSAR data[J]. Remote Sensing of Environment ,102(3) : 195-210.
- Colesanti C ,Wasowski J. 2006. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry[J]. Engineering Geology 88(3) : 173-199.
- Dai K R ,Zhuo G C ,Xu Q ,et al. 2019. Tracing the pre-failure two-dimensional surface displacements of Nanyu Landslide , Gansu province with radar interferometry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University 44(12) : 1778-1786.
- Feng W K ,Zhang G Q ,Bai H L ,et al. 2019. A preliminary analysis of the formation mechanism and development tendency of the huge Baige landslide in Jinshan River on October 11 , 2018[J]. Journal of Engineering Geology 27(2) : 415-425.
- He X F ,He M. 2012. InSAR earth observation data processing method and comprehensive measurement[M]. Beijing: Science Press.
- Herrera G ,Gutierrez F ,Garcia-Davalillo J C ,et al. 2013. Multi-sensor advanced DinSAR monitoring of very slow landslides: The Tena Valley case study(Central Spanish Pyrenees) [J]. Remote Sensing of Environment , 128(none) : 31-43.
- Kang Y. 2016. Application of InSAR technology in landslide detection and monitoring in southwest mountainous areas[D]. Xi'an: Chang'an University.
- Li L J ,Yao X ,Zhou Z K ,et al. 2017. The deformation characteristics of a large landslide before and after impoundment in the Xiluodu reservoir area based on InSAR technology[J]. Journal of Engineering Geology 25(S1) : 458-462.
- Liu X Y ,Yang Z H ,Guo C B ,et al. 2017. Study of slow-moving landslide characteristics based on the SBAR-InSAR in the Xianshuihe fault zone[J]. Geoscience 31(5) : 965-977.
- Mo Y J ,Wu Y ,Liu X W. 2018. Monitoring the ground subsidence in Xiaojin County , Sichuan province based on small baseline subset technique[J]. Engineering of Surveying and Mapping 27(11) : 46-50.
- Nie B Q. 2018. Landslide deformation detection and identification based on InSAR technology—A case of Danba County [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology.
- Tre altamira. 2017. Data in focus: precursor of Maoxian landslide measured from space[EB/OL].http://tre-altamira.com/news/data-focus-precursor-maoxian-landslide-measured-space/. 2017-06-29.
- Wang J. 2018. Long-term spaceborne InSAR technology landslide geological disaster monitoring research[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University.
- Xu J Q ,Ma T ,Lu Y K ,et al. 2019. Land subsidence monitoring in North Henan plain based on SBAS-InSAR technology[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition) 49(4) : 1182-1191.
- Xu Q ,Li W L ,Dong X J ,et al. 2017. The Xinmocu landslide on June 24 , 2017 in Maoxian , Sichuan: Characteristics and failure mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 36(11) : 2612-2628.
- Xu Q ,Zheng G ,Li W L ,et al. 2018. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3 , 2018[J]. Journal of Engineering Geology ,26(6) : 1534-1551.
- Yu R. 2014. Xi'an County landslide monitoring research based on short baseline (SBAS) technology[D]. Nanjing: Nanjing Normal University.
- Zhang J ,Feng D X ,Qi W ,et al. 2018. Monitoring land subsidence in Panjin region with SBAS-InSAR method[J]. Journal of Engineering Geology 26(4) : 999-1007.
- Zhang Y. 2018. Surface deformation monitoring based on InSAR technology and early identification of landslide[D]. Lanzhou: Lanzhou University.
- Zhao C Y ,Zhang Q ,Zhang J. 2011. Deformation monitoring of ground fissure with SAR interferometry in Qingxu , Shanxi province[J]. Journal of Engineering Geology ,19(1) : 70-75.
- 戴可人 ,卓冠晨 ,许强 ,等. 2019. 雷达干涉测量对甘肃南峪乡滑坡灾前二维形变追溯[J]. 武汉大学学报(信息科学版) : 44(12) : 1778-1786.
- 冯文凯 ,张国强 ,白慧林 ,等. 2019. 金沙江“10·11”白格特大型滑坡形成机制及发展趋势初步分析[J]. 工程地质学报 ,27(2) : 415-425.
- 何秀凤 ,何敏. 2012. InSAR 对地观测数据处理方法与综合测量[M]. 北京: 科学出版社.
- 康亚. 2016. InSAR 技术在西南山区滑坡探测与监测的应用[D]. 西安: 长安大学.
- 李凌婧 ,姚鑫 ,周振凯 ,等. 2017. 溪洛渡库区某大型滑坡蓄水前后变形特征 InAR 分析[J]. 工程地质学报 25(S1) : 458-462.
- 刘筱怡 ,杨志华 ,郭长宝 ,等. 2017. 基于 SBAS-InSAR 的鲜水河断裂带蠕滑型滑坡特征研究[J]. 现代地质 31(5) : 965-977.
- 莫玉娟 ,吴洋 ,刘学武. 2018. 基于 SBAS 技术的四川阿坝州小金县地表形变监测[J]. 测绘工程 27(11) : 46-50.
- 聂兵其. 2018. 基于 InSAR 的滑坡形变探测及隐患识别研究——以丹巴县城区为例[D]. 成都: 成都理工大学.
- 许军强 ,马涛 ,卢意恺 ,等. 2019. 基于 SBAS-InSAR 技术的豫北平原地面沉降监测[J]. 吉林大学学报(地球科学版) 49(4) : 1182-1191.
- 许强 ,李为乐 ,董秀军 ,等. 2017. 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 36(11) : 2612-2628.
- 许强 ,郑光 ,李为乐 ,等. 2018. 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 ,26(6) : 1534-1551.
- 余睿. 2014. 基于短基线(SBAS) 技术的西和县滑坡监测研究[D]. 南京: 南京师范大学.
- 张静 ,冯东向 ,慕巍 ,等. 2018. 基于 SBAS-InSAR 技术的盘锦地区地面沉降监测[J]. 工程地质学报 26(4) : 999-1007.
- 张毅. 2018. 基于 InSAR 技术的地表变形监测与滑坡早期识别研究[D]. 兰州: 兰州大学.
- 赵超英 ,张勤 ,张静. 2011. 山西清徐地裂缝形变的 InSAR 监测分析[J]. 工程地质学报 ,19(1) : 70-75.