

引用格式: 巨淑君, 高志良, 蒋明成, 高强, 屈向阳. 震后大渡河流域丹巴—乐山段地质灾害隐患[J]. 山地学报, 2023, 41(3): 411-421.

JU Shujun, GAO Zhiliang, JIANG Mingcheng, GAO Qiang, QU Xiangyang. Post-earthquake hidden dangers of geological hazards in the Danba-Leshan section of the Dadu River basin, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(3): 411-421.

震后大渡河流域丹巴—乐山段地质灾害隐患

巨淑君^{1,2}, 高志良^{2,3}, 蒋明成², 高强², 屈向阳⁴

(1. 成都理工大学, 成都 610059; 2. 国能大渡河流域水电开发有限公司, 成都 610000;

3. 大连理工大学, 辽宁 大连 116081; 4. 河南理工大学, 河南 焦作 454000)

摘要: 泸定地震导致大渡河沿线及周边区域分布有大量次生地质灾害和地质灾害隐患点, 极大制约了流域内社会经济发展, 对该区域进行大范围隐患普查和早期识别, 有助于防灾减灾工作的展开。本文基于时序 InSAR 技术对大渡河流域丹巴—乐山段超过 1000 km 范围进行了大面积滑坡隐患点普查, 并结合 PS 与 SBAS 技术有效降低西南地区复杂的时间去相干问题。研究结果表明: (1) 8 处重点关注区域存在明显的滑坡和崩塌隐患点, 主要集中在石棉和泸定地区, 其中部分隐患点对流域有较大安全威胁。(2) 泸定地震导致黄草坪、郑家坪与新华村典型隐患区产生加速沉降趋势, 地面人员应重点观测。本研究可为后续分析泸定地震后灾害分布情况及流域内大坝及边坡变形机理分析和灾害预警提供可靠信息及数据支撑。

关键词: InSAR; SBAS; 隐患; Sentinel-1; 大渡河

中图分类号: P

文献标志码: C

2022 年 9 月 5 日 12 时 52 分, 四川省泸定县磨西镇发生 Ms6.8 级地震, 震源深度 16 km, 震中位置为 102.08°E, 29.59°N^[1]。受泸定地震影响, 大渡河沿线发生了大规模山体滑坡与崩塌^[2], 碎石堆积严重妨碍了周边道路的正常通行。同时, 大量土石材料进入河道, 存在生成堰塞湖的风险, 可能威胁到大渡河的正常水流。值得注意的是, 此次地震震级较高, 余震频繁, 并伴随降雨事件发生, 崩塌、滑坡及泥石流等地质灾害发生的可能性较高。大渡河流域作为中国重要的水电资源开发基地, 对该地区的大范围隐患普查和早期识别, 可以最大程度地减小灾害造成的损失, 对区域的防灾减灾工作具有重要意义。

目前, 大渡河区域地质灾害隐患识别手段主要

依赖于传统地面监测方法, 采取人工排查、无人机摄影测量^[3]和 GNSS 基站监测等技术, 对个别路段和点位进行重点监视, 虽然能实现高精度监测, 但很难获取到大面积、高密度的形变信息^[4-5]。同时, 流域地质环境恶劣, 植被覆盖茂密, 隐患点具有隐蔽性强、分布范围广、调查难度大等特点, 给地面监测手段带来较大挑战^[6-7]。合成孔径雷达干涉测量 (interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 技术因具有全天时、全天候、大范围高分辨率对地观测能力, 能够实现对微小地表形变的高精度监测^[8-11], 近年来在大范围地质灾害隐患监测领域中的应用潜力已逐渐获得认知和肯定, 并在西南地区的灾害调查中得到了成功应用^[12-16]。

本文利用 2017—2022 年 SAR 影像数据, 基于

收稿日期 (Received date): 2022-12-23; 改回日期 (Accepted date): 2023-06-20

基金项目 (Foundation item): 四川省科技计划项目 (2022YFG0120); 科技创新项目 (KB-KY-2021-001)。[Sichuan Science and Technology Plan Project (2022YFG0120); Science and Technology Innovation Project (KB-KY-2021-001)]

作者简介 (Biography): 巨淑君 (1985-), 女, 青海格尔木人, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向: 水电站水库大坝安全管理、地质灾害预测预警。[JU Shujun (1985-), female, born in Golmud, Qinghai province, engineer, M. Sc. candidate, research on hydropower station reservoir dam safety management, geological disaster prediction and early warning] E-mail: shujun.ju@chnenergy.com.cn

时序 InSAR 技术对大渡河流域丹巴—乐山段进行大范围地表变形监测,掌握泸定地震后隐患区域分布情况,并排查大渡河区域新增隐患区域,进一步选取重点监测区域进行地质灾害隐患监测与分析。本研究可为流域内大坝和边坡变形机理分析及灾害预警提供可靠数据和信息支撑,为有效提升该地区灾害治理奠定基础。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区域

大渡河流域地形复杂,经川西北高原、横断山地区东部和四川盆地西缘,由北向南流经金川、丹巴、泸定等地,至石棉折向东,构成“L”字形河流走向。整个流域峡谷地段共 1062 km,相对高差达到 2000 ~ 3000 m,沿线河谷遍布高陡边坡与危岩体,是中国地质灾害隐患重灾区^[17]。

大渡河流域是中国西南水电开发总体布局的重要靶区,也是南水北调西线工程的重要水源区。受 2022 年泸定地震影响,大渡河沿线地质灾害隐患增加,各类突发性地质灾害,不仅会阻碍大渡河的正常水流,同时也会阻断流域内唯一通道(S211 省道),阻碍水电站正常运行和居民正常生活。因此,对大渡河地区进行大范围监测需求较为迫切。本文选取大渡河丹巴-乐山段作为研究区,如图 1 中蓝线所示。

1.2 数据来源与处理

本文使用的 SAR 影像数据为 Sentinel-1A,该卫星数据是欧空局提供的 C 波段(波长 5.6 cm)中等分辨率 SAR 影像数据^[18],其幅宽较大(250 km)、重访周期短(12 天),拥有丰富的历史存档数据,适用于大渡河流域大范围 InSAR 监测。本文选取覆盖研究区不同轨道的三个片区 Sentinel-1 升轨数据,按轨道号排序为 26-1,26-2 和 128-1,如图 2 红色框所

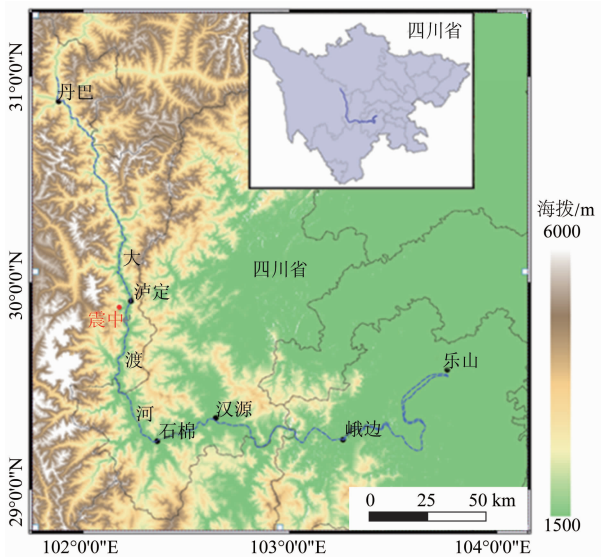


图 1 大渡河(蓝色线)流域位置与高程分布图及地震点位置图
Fig. 1 Location of the Dadu River (blue line) basin, elevation distribution and seismic point

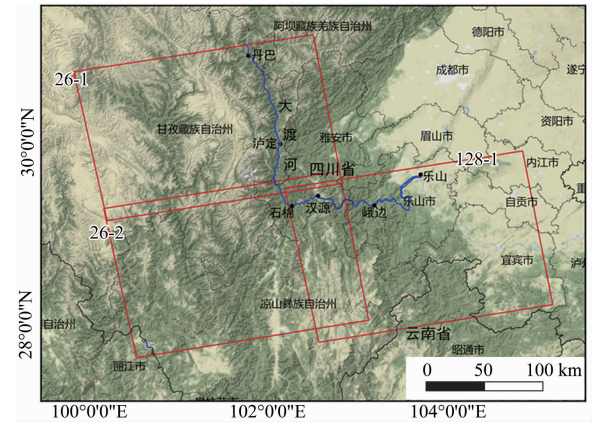


图 2 大渡河(蓝色线)区域 SAR 影像覆盖区域(红色框)
Fig. 2 Location of SAR image coverage(red box) along the Dadu River(blue line), China

示。每个片区获取 102 景 SAR 影像,影像拍摄时间为 2017 年 10 月到 2022 年 10 月,极化方式为 VV 极化,TOPS 成像模式 IW 类型数据,总数据量达到了 1.25 TB(表 1)。此外,获取 Sentinel-1 数据对应

表 1 研究区 SAR 影像数据详细参数

Tab. 1 Detailed parameters of SAR image data of the study area

轨道号	轨道/极化	入射角/(°)	分辨率(方位×距离)/m	获取日期	影像数/景
26-1	升轨/ VV	43.9	14.0 × 2.3	2017-10—2022-10	102
26-2	升轨/ VV	43.9	14.0 × 2.3	2017-10—2022-10	102
128-1	升轨/ VV	33.9	14.0 × 2.3	2017-10—2022-10	102

时间的精轨文件,以修正轨道参数信息,以及时序 InSAR 处理过程需要使用的的外部高程数据,采用 SRTM 30 m DEM。

2 研究方法

传统的基于永久散射体 PSI 技术^[19]在时间基线较长时会出现严重的时间去相干误差,导致较大形变解算误差;而 SBAS(Small Baseline Subsets, 小基线集)技术^[20]在复杂的西南山区,大量阴影和叠掩区域的存在,会导致形变估计结果出现较大的分块跳变误差。

2.1 InSAR 数据处理

为了研究 2018—2021 年较长时间跨度的大渡河流域地表形变信息,本文采用 PSI 和 SBAS(Small Baseline Subsets,小基线集技术)相结合的 PS-SBAS 方法,通过选取永久散射体 PS,并利用小基线干涉获取 PS 点对应的差分干涉相位,避免长时间基线干涉受阴影等低相干区域影响,最后采用 SBAS 处理思路完成数据处理,基本原理如下:

对一组获取时间为 $\{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ 的 SLC 数据,基于幅度稳定性方法识别出 M 个具有稳定散射特性的 PS 点, $\{PS_1, PS_2, \dots, PS_M\}$ 。根据区域干涉图质量,选择合适的时间基线和空间阈值,同时可以依据相干系数阈值,筛选得到一组具有 K 个干涉对的小基线集组合,并对 PS 点的复数据进行干涉和差分干涉处理,得到去除平地 and 地形相位的 PS 点差分干涉图,经过空域二维相位解缠后得到解缠干涉相。此时由获取时间为 $\{t_i, t_j\}$ 组成的解缠干涉图,第 m 个 PS 点解缠相位由以下几个分量组成:

$$\varphi_{i,j}^m = \varphi_{\text{topo}}^m + \varphi_{\text{def}}^m + \varphi_{\text{atm}}^m + \varphi_{\text{noise}}^m \quad (1)$$

式中, φ^m 为第 m 个 PS 点解缠相位; φ_{topo}^m 为残余地形相位; φ_{def}^m 为形变相位; φ_{atm}^m 为大气相位; φ_{noise}^m 为噪声相位。为了消除大气相位的干扰,通常假定大气为空间缓变信号,通过相邻 PS 点差分后,可以有效抑制大气相位的影响,此时差分后的相位主要包含高程和形变相位。一般构建高程和形变的线性模型,其中残余高程可表示为:

$$\varphi_{\text{topo}}^m = \frac{4\pi B_{\perp} h^m}{\lambda r \sin \theta} \quad (2)$$

式中, λ 为雷达波长; B_{\perp} 为垂直基线; r 为斜距; h 为高程差; θ 为入射角。

形变相位为时间 t 的线性函数,可以根据小基线集组合相位时间序列,得到相位变化速率,即:

$$v_k = \frac{\varphi_k - \varphi_{k-1}}{t_k - t_{k-1}}, k = 2, 3, \dots, K \quad (3)$$

式中, v 为相位变化速率; φ 为形变相位; t 为时间; K 为干涉对小基线集组合。

组合每个干涉相位观测值,可以得到如下线性方程组:

$$T[v_1, v_2, \dots, v_{K-1}]^T + \frac{4\pi h}{\lambda r \sin \theta} [B_1^{\perp}, B_2^{\perp}, \dots, B_K^{\perp}]^T = [\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \dots, \Delta\varphi_K]^T \quad (4)$$

式中, T 为系数矩阵,每行只有 1 和 -1 两个非 0 值,位置一一对应于干涉对组合。对式(4)利用奇异值分解 SVD 算法,可以解算得到形变速率和残余高程值的最小二乘解,最后叠加上经过大气滤波后得到的非线性形变分量,得到最终的形变结果。具体数据处理过程如下:以 26-1 区域数据为例,选取获取时间为 2019-12-04 的 SAR 影像作为主参考影像数据,将其他辅图像配准到主影像参考坐标下,采用针对 TOPS 模式数据的配准算法,得到配准好的 SLC 数据。基于幅度离差法选取 PS 点后,以时间基线 100 d、空间基线 150 m 作为阈值获取干涉对组合,并利用 30 m SRTM 数据生成差分干涉图。待利用 MCF(最小费用流)算法进行相位解缠后,对形变和高程参数进行估计,并根据残余相位质量迭代多次解算,得到线性形变速率和残余高程,最后利用 SVD 算法进行解算,并经过大气滤波后,得到最终的形变时间序列。同时,依据时序相干系数阈值 0.7 精选 PS 点,地理编码后得到 shapefile 格式的形变结果文件。完整的数据处理流程如图 3 所示。

2.2 地震影响分析

为了评估研究区受地震影响的大小,利用有效峰值加速度(EPA)来评估研究区地震反应的强弱^[21-23]。从中国地震目录获取泸定县 Ms6.8 级地震信息,在此基础上利用有感半径与震级之间的关系计算泸定地震有感半径。同时计算研究区与震中的距离,如果震中距大于有感半径,则泸定地震对研究区有影响;如果震中距小于有感半径,则泸定地震对研究区影响较小可忽略^[24]。通过下式筛选出泸定地震影响区域。

$$R = 10^{-2.083+0.974M} (M \leq 5) \quad (5)$$

$$R = 10^{0.611+0.289M} (M \geq 5) \quad (6)$$

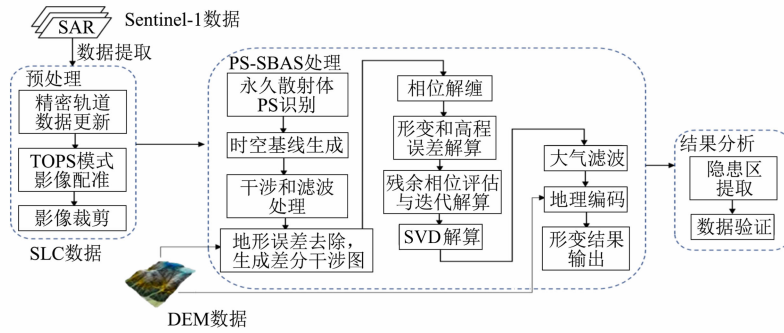


图 3 PS-SBAS 处理流程图

Fig. 3 Flowchart of PS-SBAS method

式中, R 为有感半径; M 为震级。

通过计算发现,在泸定 Ms6.8 级地震作用下,其有感半径为 376 km。同时,由于研究区内缺乏加速度记录,研究区内有效峰值加速度通过中国西部地震加速度关系衰减关系式来确定^[25]。有效峰值加速度在长轴上的衰减关系为:

$$EPA^{lw} = 10^{2.492+0.786M-2.787\log[D+3.296\exp(0.451M)]} \quad (7)$$

$$e = 0.242$$

在短轴上的衰减关系式为:

$$EPA^{sw} = 10^{1.093+0.591M-1.7941\log[D+1.04\exp(0.451M)]} \quad (8)$$

$$e = 0.242$$

式中, D 为震中距; M 为震级; EPA 为地震有效峰值加速度。对于中国大陆地震来说,发震断层的走向不明确,等震线长短轴的方向亦不明确。为此,本文忽略等震线长短轴走向与地震影响点的方位关系,分别计算出长短轴方向上有效峰值加速度,取其几何平均值作为地震影响点的有效峰值加速度参考值:

$$EPA = \sqrt{EPA^{lw} EPA^{sw}} \quad (9)$$

$$EPA^e = \sqrt{EPA^{le} EPA^{se}} \quad (10)$$

式中, EPA 为有效峰值加速度几何平均值; EPA^{lw} 为长轴方向有效峰值加速度值; EPA^{sw} 为短轴方向有效峰值加速度值; EPA^{le} 为长轴方向有效峰值加速度衰减关系式标准差; EPA^{se} 为短轴方向有效峰值加速度衰减关系式标准差。

3 结果分析

3.1 大渡河流域总体结果分析

采用上节所述的 PS-SBAS 处理流程,对区域

26-1、26-2 和 128-1 这三个片区 2017—2022 年 Sentinel-1 数据进行处理分析。本文获取大渡河流域丹巴至乐山段完整的大范围 InSAR 形变测量结果,由于关注重点是大渡河流域以及 S211 省道沿线两侧的区域,截取了大渡河流域沿岸 1 km 缓冲区的形变结果,其时空分布如图 4 所示。

图 4 中每个点都对应于 SAR 影像上选取的高相干散射点,形变解算结果均为雷达视线方向上的 (LOS) 位移速率 (单位为 mm/a), 并根据其年形变速率进行颜色编码,其正负代表远离或靠近卫星方向。时序 InSAR 技术获取到总的点密度分布在 106 个/km², 总体形变速率范围为 -176 ~ 153 mm/a。根据形变速率大小以及时序变化曲线,从总体上看,大部分区域地表形变都比较小或接近 0, 仅有少部

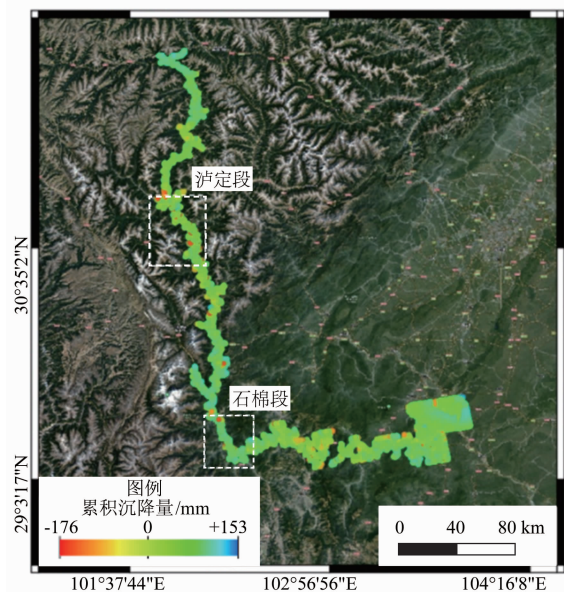


图 4 大渡河流域 InSAR 形变结果

Fig. 4 InSAR deformation results in the Dadu River, China

分形变较大的区域主要聚集在泸定和石棉等地,同时该区域也是泸定地震影响较为严重区域。从图 4 中可以观测到,沿着大渡河存在多处明显沉降区域(黄色和红色点)。除此之外,其他区域由于植被覆盖茂密,以及坡体朝向、地形起伏与 SAR 侧视成像几何问题的影响,缺少足够多的 PS 测量点覆盖,无法获取准确的形变信息。

3.2 隐患区识别与分析

对大渡河流域泸定地震重点关注区域 InSAR 结果进行大范围解译,综合考虑形变速率大小、累积变形量、震中距和 EPA,同时保证测量区域在 SAR 影像上相干性较高、测量结果较为可靠。通过结合光学图像对比分析,最终确定了 8 处重点关注区域,并在区域内监测到明显的滑坡崩塌灾害情况。其中多个隐患区的变形区域发育在大渡河附近,坡体失稳严重,对边坡下方的公路、水电站及大渡河构成较大威胁,需要地面测量人员重点关注。可以看到,卫星 InSAR 技术和光学影像辅助解译方法极大提高

了大渡河流域灾害监测效率,对识别一些隐蔽滑坡隐患区具有明显优势。具体的隐患点分布和形变信息见表 2。为了进一步说明隐患区域情况,同时验证 InSAR 测量结果的合理性,本文针对泸定地震重点关注区域进行深入分析,包括猴子岩水电站区域、黄草坪变形体区域及郑家坪区域。

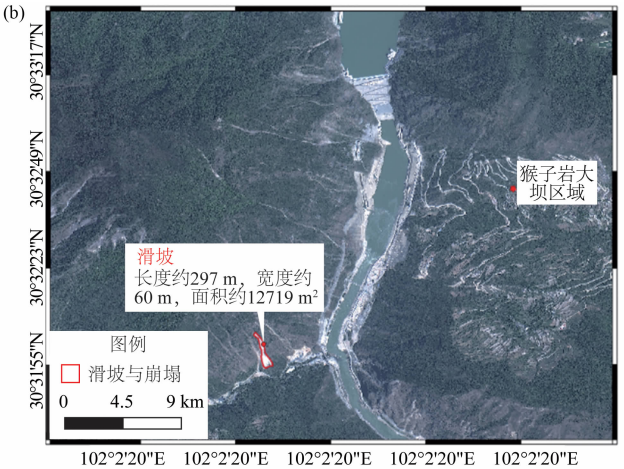
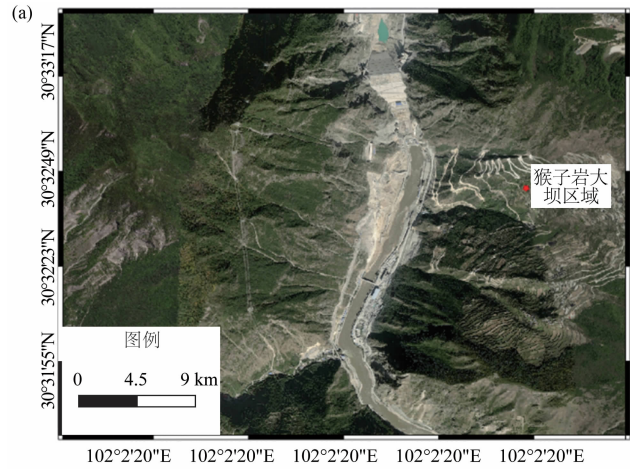
(1)猴子岩水电站区域灾前灾后对比分析

猴子岩水电站位于康定县孔玉乡,距离泸定地震震源点约 105 km,该隐患边坡紧邻大渡河,坡度较为陡峻。提取该区域 InSAR 测量结果(图 5),可看到该区域最大形变速率达到了 15.82 mm/a,从 2017 年 6 月到 2022 年 10 月最大累积沉降量达到了 64.38 mm。提取坡面三个点 T1、T2 及 T3 的形变时间曲线序列,这三个典型点位的形变曲线上表现出匀速下沉趋势。其中,从变形点 T3 时序散点图中可以看出,该边坡一直处于线性形变趋势,且一直未收敛,累计变形 139.38 mm。通过对比地震前后研究区灾害影像(图 5)发现,点 TS3 处发生滑坡,

表 2 主要滑坡隐患区列表

Tab. 2 Identified hidden landslide regions

序号	形变隐患点区域	震中距/km	EPA/Gal	年形变速率/(mm·a ⁻¹)	累积沉降量/mm	威胁对象
1	猴子岩-林邦滑坡体	125	21.75	6.23	37.60	大渡河
2	开绕村	117	24.24	—	4.61	大渡河
3	猴子岩大坝区域	105	28.82	-15.82	-64.38	水电站、大渡河
4	黄草坪变形体	12	268.14	-25.86	85.38	公路、大渡河
5	郑家坪与新华村变形体	13	256.95	-29.58	-148.47	公路、大渡河
6	大岗山水电站	21	188.27	-24.72	-106.73	水电站、居民、大渡河
7	海螺沟地质公园	2	437.52	—	—	居民、大渡河
8	大沟村	10	292.85	—	—	居民



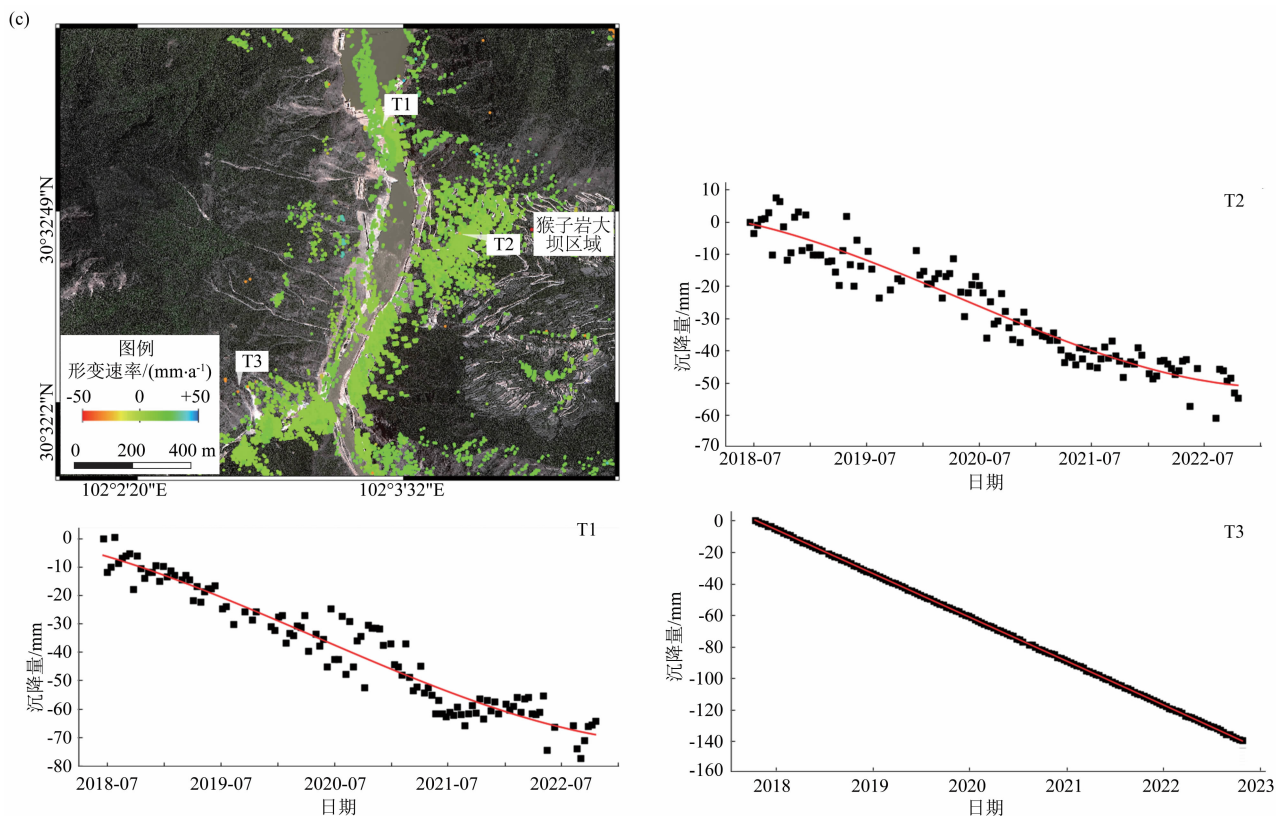


图5 猴子岩水电站区域灾害前后影像:(a)灾害前影像;(b)灾害后影像;(c)区域形变分布与特征点形变曲线

Fig. 5 Images before and after the regional disaster at Houziyan hydropower station: (a) pre-disaster image; (b) post-disaster image; (c) regional deformation distribution, and feature point deformation curve

InSAR 测量结果与实际情况相符。地震和水流冲刷影响,加剧了边坡失稳现象,给坡底大渡河带来一定威胁,其危险程度较高,需要地面测量人员持续关注。

(2) 黄草坪变形体及大岗山水电站灾前灾后就对比分析

黄草坪变形体位于大渡河左岸泸定县得妥镇新华村,距离大岗山坝址 16.8 km,变形体前缘高程约 1115 m,后缘高程约 1600 m,顺河长度约 500 m,宽度约 660 m,交通公路位于变形体前缘。黄草坪区域在 2022 年 8 月与 2022 年 10 月的 Stacking 数据监测结果如图 6 所示。对比图 6a、6b 可以看出,该区域在地震后沉降值点位颜色为深红色的点明显增多,说明地震加大了该区域的形变。同时,根据黄草坪区域在 2020 年 1 月 2022 年 10 月的 InSAR 监测结果显示,该区域的形变速率在 -30 mm/a 至 18 mm/a 之间波动,最大累计沉降量为 85.38 mm。提取坡面三个点 T1、T2 及 T3 的形变时间曲线序列如图 6 所示,这三个典型点位的形变曲线上表现出持

续性下沉趋势,且近期沉降均有加速趋势,整体形变量较大。地震作用下黄草坪变形体处 EPA 达 268.14 Gal,地震对其影响较大。同时通过对距离其 7 km 处的大岗山水电站进行监测发现,地震发生后其特征点形变曲线变化明显,使大坝产生了一次明显沉降(图 7)。

(3) 郑家坪与新华村变形体灾前灾后就对比分析

郑家坪与新华村区域形变体位于泸定县,长度约 1.5 km,该隐患区域属于公路两侧边坡,距离水电站及大渡河河面较近且地震对其影响较大,若垮塌可能造成公路损毁和堵江,是流域的重点关注区,有地面测量人员长期监视。由该区域形变曲线图(图 8)可知,地震发生后该区域沉降速率明显增大,2017—2022 年最大累计形变量为 -148.47 mm ,最大变形速率 -29.58 mm/a ,提取坡面三个点 T1、T2 及 T3 的形变时间曲线序列发现地震发生后滑坡存在明显沉降区,其中 T1 最大累积变形达到 107.74 mm。

为了对 InSAR 形变测量结果进行验证,利用附

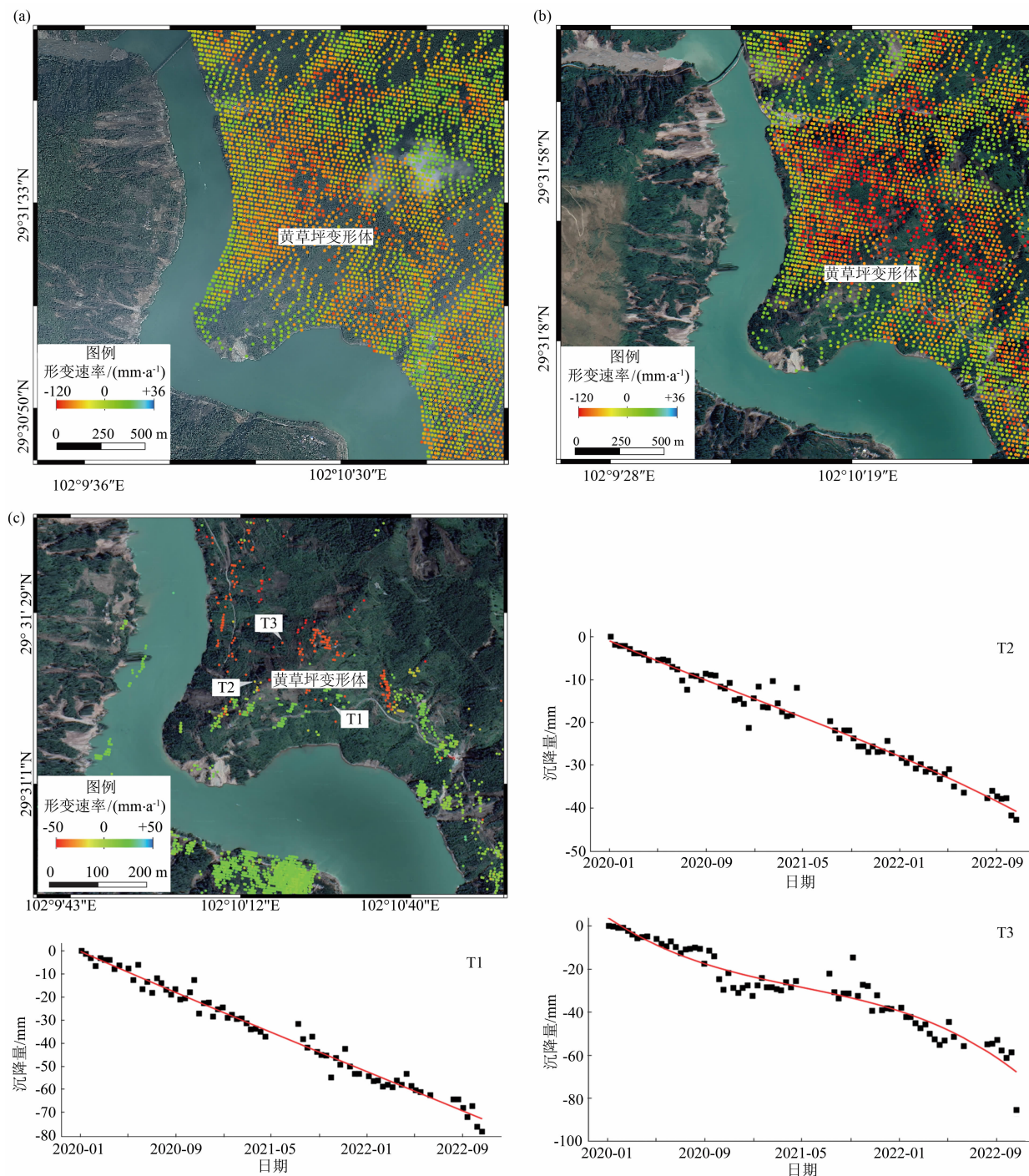


图6 黄草坪变形体区域灾害前后 Stacking 图:(a)灾害前影像;(b)灾害后影像;(c)区域变形分布与特征点变形曲线

Fig. 6 Stacking map before and after disasters in the yellow lawn area;

(a) pre-disaster image; (b) post-disaster image; (c) regional deformation distribution and feature point deformation curve

近的地面 GNSS 测量结果(图 8 中 TS1 附近)进行对比分析。获取离 InSAR 测量区域最近的两个 GNSS 站点 ZP13 和 ZP14,将其 GNSS 测量结果投影到 InSAR 的卫星视线 LOS 方向。为了去除两者参考点差异,对 InSAR 与 GNSS 两点分别差分的结果如

图 9 所示,其中红色星状为 GNSS 测量数据投影结果,蓝色圆圈为 InSAR 形变测量结果。

InSAR 测量结果与 GNSS 在整体能够保持较好的一致性,其形变趋势是相同的,两者形变量曲线间最大误差低于 10 mm,主要差异是 InSAR 测量点与

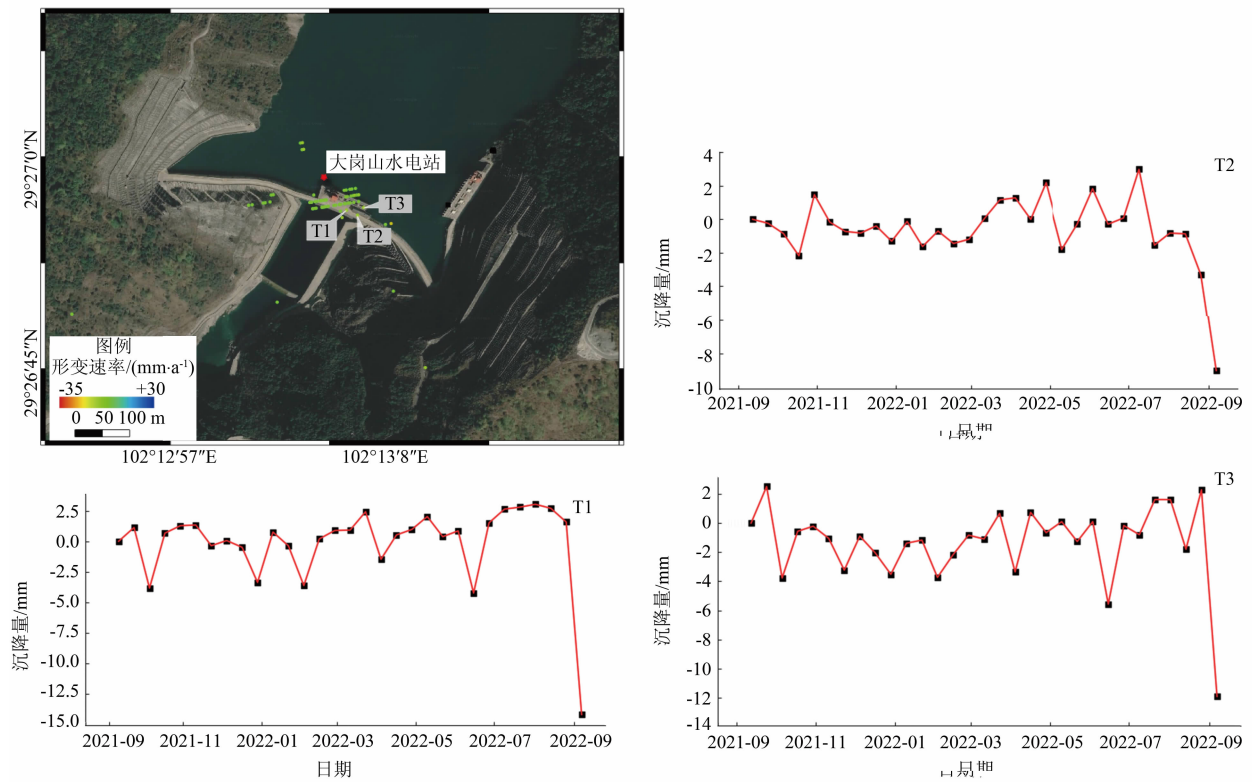


图 7 大岗山水电站特征点变形曲线

Fig. 7 Characteristic point deformation curve of the Dagangshan hydropower station

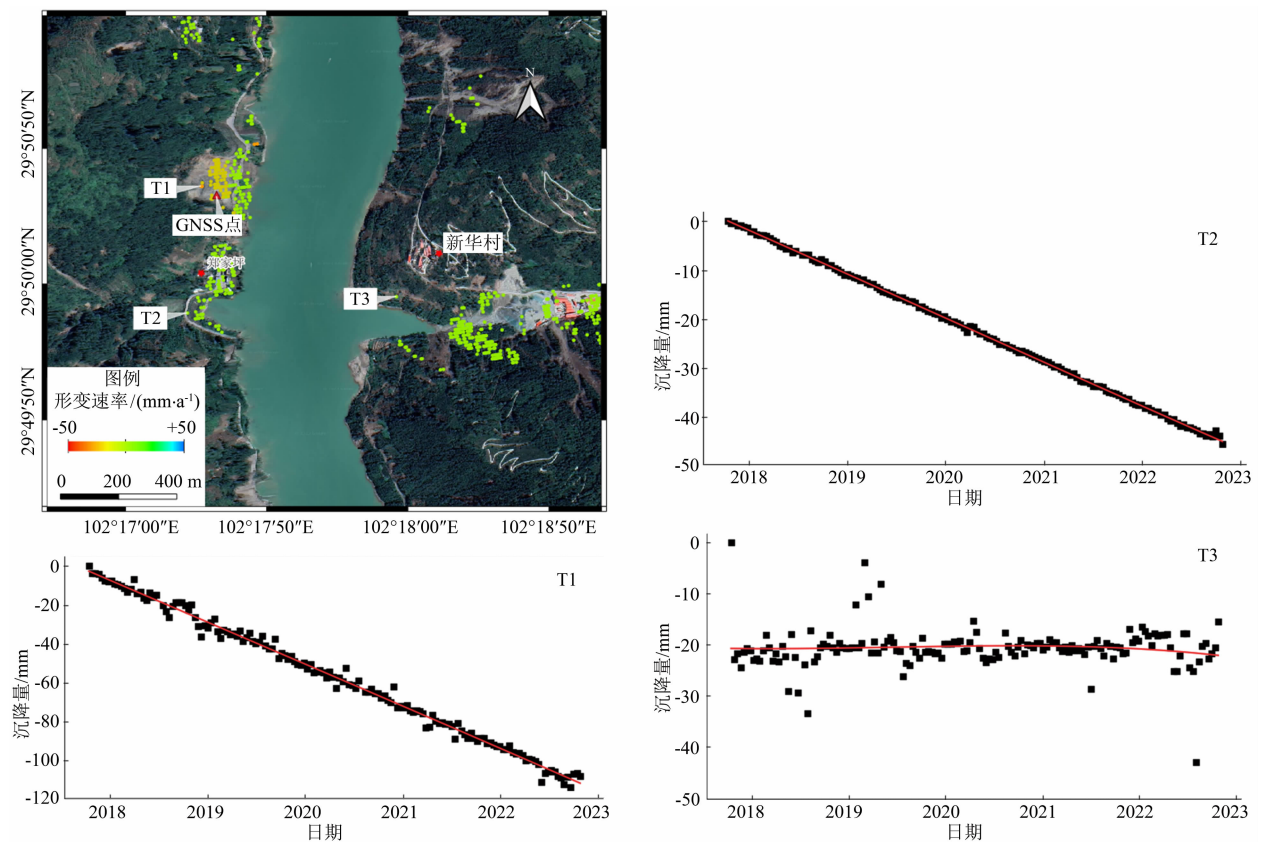


图 8 郑家坪与新华村变形体形变分布及特征点变形曲线

Fig. 8 Deformation in Zhenjiaping and Xinhua village

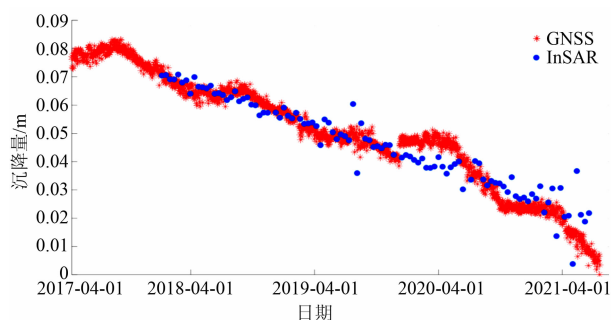


图9 郑家坪区域 InSAR 与 GNSS 测量结果对比图

Fig. 9 Deformation comparison between
InSAR and GNSS in Zhenjiaping

GNSS 站点并不完全相同所致,误差在可接受范围,证明了该区域 InSAR 测量结果的准确性。

4 讨论

本文基于时序 InSAR 技术完成了对大渡河流域丹巴—乐山段大范围滑坡灾害监测普查研究,利用 2017—2022 年期间获取的多轨 Sentinel-1 数据获取了区域隐患点分布情况,构建了大渡河流域隐患快速监测识别方法。研究发现 8 处区域存在明显的滑坡崩塌灾害情况,对最大沉降速率为 $-30 \sim 6.23$ mm/a、具有较大安全威胁和堵塞河流风险较大的隐患点,进行了详细描述和危害评估。最后,本文对几个典型隐患区域进行了深入分析和验证,进一步核对了 InSAR 测量结果的合理性。同时,本研究证明了 InSAR 技术可以被用于复杂地质环境下的大范围隐患普查,能够以较低成本快速获取灾害分布图,为相关部门进行防灾减灾工作提供丰富的数据支撑,也为全国其他流域的灾害监测提供参考范例。

5 结论

本研究通过时序 InSAR 技术对大渡河流域进行大面积滑坡隐患点普查,结论如下:

(1)从整体结果来看,受泸定地震影响较为严重的区域主要集中在泸定段和石棉段。通过 InSAR 技术监测到多个隐患区的变形区域发育在大渡河附近,坡体失稳严重,对下方的公路、水电站及大渡河造成严重威胁。

(2)通过对比靠近泸定地震的黄草坪、郑家坪和新华村地震前后灾害影像图及特征点变形曲线发现,泸定地震导致特征点变形区域均有加速沉降趋势,地面观测人员应重点关注。分析郑家坪变形体特征点形变测量结果与附近地面 GNSS 测量结果发现,两者结果在整体上能够保持较好的一致性,主要误差低于 10 mm,证明测量结果准确可靠。

(3)本研究证明了 InSAR 技术可以被用于隐患普查,可以为全国其他流域灾害监测提供参考范例。

参考文献 (References)

- [1] 韩炳权, 刘振江, 陈博, 等. 2022 年泸定 Mw 6.6 地震 InSAR 同震形变与滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, **48**(1): 36 - 46. [HAN Bingquan, LIU Zhenjiang, CHEN Bo, et al. Coseismic deformation and slip distribution of the 2022 Luding Mw 6.6 earthquake revealed by InSAR observation [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, **48**(1): 36 - 46] DOI: 10.13203/j.whugis20220636
- [2] 铁永波, 张宪政, 卢佳燕, 等. 四川省泸定县 Ms6.8 级地震地质灾害发育规律与减灾对策[J]. 水文地质工程地质, 2022, **49**(6): 1 - 12. [TIE Yongbo, ZHANG Xianzheng, LU Jiayan, et al. Characteristics of geological hazards and its mitigations of the Ms6.8 earthquake in Luding county, Sichuan province [J]. Hydrogeology and engineering geology, 2022, **49**(6): 1 - 12] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209023
- [3] 葛大庆, 戴可人, 郭兆成, 等. 重大地质灾害早期识别中综合遥感应用的思考与建议[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, **44**(7): 949 - 956. [GE Daqing, DAI Keren, GUO Zhaocheng, et al. Early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies: Thoughts and recommendations [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, **44**(7): 949 - 956] DOI: 10.13203/j.whugis20190094
- [4] LAN H, MARTIN C D, ZHOU C, et al. Rockfall hazard analysis using LiDAR and spatial modeling [J]. Geomorphology, 2010, **118**(1-2): 213 - 223. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.01.002
- [5] GORUMT. Landslide recognition and mapping in a mixed forest environment from airborne LiDAR data [J]. Engineering Geology, 2019, **258**: 105155. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105155
- [6] SU Lijun, HU Kaiheng, ZHANG Weifeng, et al. Characteristics and triggering mechanism of Xinmo landslide on 24 June 2017 in Sichuan, China [J]. Journal of Mountain Science, 2017, **14**(9): 1689 - 1700. DOI: 10.1007/s11629-017-4568-8
- [7] 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): 2612 - 2628. [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): 2612 – 2628] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0855
- [8] CROSETTO M, MONSERRAT O, CUEVAS-GONZALEZ M, et al. Persistent Scatterer Interferometry: A review [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, **115**(5): 78 – 89. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011
- [9] 李鹏, 李振洪, 李陶, 等. 宽幅 InSAR 大地测量学与大尺度形变监测方法[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2017, **42**(9): 1195 – 1202. [LI Peng, LI Zhenhong, LI Tao, et al. Wide-Swath InSAR geodesy and its applications to large-scale deformation monitoring [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, **42**(9): 1195 – 1202] DOI: 10.13203/j.whugis20150587
- [10] 杨成胜, 张勤, 赵超英, 等. 短基线集 InSAR 技术用于大同盆地地面沉降、地裂缝及断裂带监测中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, **39**(8): 945 – 950 [YANG Chengsheng, ZHANG Qin, ZHAO Chaoying, et al. Small baseline subset InSAR technology used in Datong basin ground subsidence, fissure and fault zone monitoring [J]. Geomatics Information Science of Wuhan University, 2014, **39**(8): 945 – 950] DOI: 10.13203/j.whugis20130656
- [11] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害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. [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] DOI: 10.13203/j.whugis20190088
- [12] INTRIERI E, RASPINI F, FUMAGALLI A, et al. The Maoxian landslide as seen from space: Detecting precursors of failure with Sentinel-1 data [J]. Landslides, 2018, **15**(12): 123 – 133. DOI: 10.1007/s10346-017-0915-7
- [13] 王战卫. 基于 SBAS—InSAR 技术的青海大通县滑坡识别方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019: 62. [WANG Zhanwei. Research on landslide identification method in Datong county, Qinghai based on SBAS-InSAR technology [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019: 62] DOI: 10.26986/d.cnki.gcdlc.2019.000568
- [14] 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): 2039 – 2049. [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): 2039 – 2049] DOI: 10.13203/j.whugis20180181
- [15] 黄会宝, 马芳平, 沈定斌, 等. 大渡河流域大坝智能监测探索与实践[J]. 水电与抽水蓄能, 2022, **8**(3): 16 – 22 + 34. [HUANG Huibao, MA Fangping, SHEN Dingbin, et al. Exploration and practice of dam intelligent monitoring in Dadu River Basin [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2022, **8**(3): 16 – 22 + 34] DOI: 10.3969/j.issn.2096-093X.2022.03.004
- [16] 徐晓雪, 季灵运, 张文婷, 等. 基于相干性的 InSAR 时间序列方法追溯四川雅安地区汉源滑坡灾前形变[J]. 地球科学与环境学报, 2022, **44**(4): 632 – 640. [XU Xiaoxue, JI Lingyun, ZHANG Wenting, et al. Pre-failure displacements of Hanyuan landslide in Ya'an area of Sichuan, China traced by a coherence-based InSAR time series method [J]. Journal of Earth Science and Environment, 2022, **44**(4): 632 – 640] DOI: 10.19814/j.jese.2021.06015
- [17] 巴仁基, 王丽, 郑万模, 等. 大渡河流域地质灾害特征与分布规律[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2011, **38**(5): 529 – 537. [BA Renji, WANG Li, ZHENG Wanmo, et al. Characteristics and distribution of geological disasters in Dadu River Basin [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 2011, **38**(5): 529 – 537] DOI: 10.3969/j.issn.1671-9727.2011.05.009
- [18] TORRES R, SNOEIJ P, GEUDTNER D, et al. GMES Sentinel-1 mission [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, **120**: 9 – 24. DOI: 10.1016/j.rse.2011.05.028
- [19] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, **38**(5): 2202 – 2212. DOI: 10.1109/36.868878
- [20] 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. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792
- [21] 王秀英, 聂高众. 汶川 Ms 8.0 级地震诱发崩塌特点及其与地震动参数对应关系初析[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(9): 1378 – 1383. [WANG Xiuying, NIE Gaozhong. Characteristics of landslides induced by Wenchuan Ms 8.0 earthquake and preliminary analysis of their relations with ground motion parameters [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(9): 1378 – 1383] DOI: 1000-4548(2009)09-1378-06
- [22] 王秀英, 聂高众, 王登伟. 利用强震记录分析汶川地震诱发滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(11): 2369 – 2376. [WANG Xiuying, NIE Gaozhong, WANG Dengwei. Analysis of landslides induced by Wenchuan earthquake by strong motion records [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(11): 2369 – 2376] DOI: 1000-6915(2009)11-2369-08
- [23] 王秀英. 地震滑坡灾害快速评估技术及对应急影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(10): 2159 – 2159. [WANG Xiuying. Study of fast evaluation technology of earthquake-induced

- landslides and their effects on earthquake emergency rescue [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29** (10): 2159 – 2159] DOI: 10.3969/j. issn. 0235 – 4975. 2011. 07.012
- [24] 汪素云, 时振梁. 有感半径与震级的关系及其应用[G]//国家地震局震害防御司. 中国地震区划文集. 北京: 地震出版社, 1993: 179 – 184. [WANG Suyun, SHI Zhenliang. Relationship between sensible radius and magnitude and its application [G]// Earthquake Damage Prevention Department of the National Earthquake Administration. Collection of Seismic Zoning in China. Beijing: Earthquake Press, 1993: 179 – 184]
- [25] 汪素云, 俞言祥, 高阿甲, 等. 中国分区地震动衰减关系的确定[J]. 中国地震, 2000, **16**(2): 99 – 106. [WANG Suyun, YU Yanxiang, GAO Ajia, et al. Development of attenuation relations for ground motion in China [J]. Earthquake Research in China, 2000, **16**(2): 99 – 106] DOI: 10.3969/j. issn. 1001 – 4683. 2000.02.001

Post-Earthquake Hidden Dangers of Geological Hazards in the Danba-Leshan Section of the Dadu River Basin, China

JU Shujun^{1, 2}, GAO Zhiliang^{2, 3}, JIANG Mingcheng², GAO Qiang², QU Xiangyang⁴

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Guoneng Dadu River Basin Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610000, China;

3. Dalian University of Technology, Dalian 116081, Liaoning, China;

4. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China)

Abstract: Affected by the Luding earthquake, a large number of geological hazards were generated along and around the Dadu River, which greatly restricts the social and economic development of the basin. The large-scale geological hazard survey and early identification of the region are helpful to disaster prevention and mitigation. In this paper, based on the time-series InSAR technology, a large-scale landslide hazard point survey was carried out in the Dadu-Leshan section of the Dadu River basin over 1000 km. Combined with PS and SBAS technology, the complex time decoherence problem in the southwest region was effectively reduced. Results show that: (1) There were obvious landslides and avalanches in eight key areas of concern, mainly concentrated in the Shimin and Luding areas, some of which posed a significant safety threat to the watershed. (2) The Luding earthquake resulted in a accelerated subsidence trend in the typical hazard areas of Huangcaoping, Zhengjiaping, and Xinhua village. The trend should be monitored by ground personnel. This study provides reliable information and data support for subsequent analyses of disaster distribution after the Luding earthquake and the deformation mechanisms of dams and slopes in the watershed, as well as for disaster early warning.

Key words: InSAR; SBAS; geological hazards; sentinel-1; the Dadu River

(责任编辑 李嵘 朱颖彦)