

DOI:10.13203/j.whugis20180181



文章编号:1671-8860(2018)12-2039-11

# 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

张 路<sup>1</sup> 廖明生<sup>1</sup> 董 杰<sup>1,2</sup> 许 强<sup>3</sup> 龚健雅<sup>2,1</sup>

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

3 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都,610059

**摘 要:**滑坡是仅次于地震、发生最频繁、造成损失最严重的一种地质灾害,中国西部山区则是世界上滑坡灾害分布最密集的地区之一。广域范围内滑坡灾害隐患的早期识别是地质灾害防治工作中的一项关键任务,基于星载合成孔径雷达重复轨道观测的时间序列雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术在此领域具有巨大的应用潜力,但以永久散射体干涉测量为代表的传统时序 InSAR 方法在西部山区应用中往往受到植被覆盖等不利因素的影响,滑坡探测识别的可靠性较差。针对这一问题,以大渡河上游丹巴县为例,采用自主研发的相干散射体时序 InSAR(coherent scatterer InSAR, CSI)方法,从历史存档的 ALOS PALSAR 和 ENVISAT ASAR 数据集中成功识别出了 17 处持续变形中的不稳定坡体,通过与外部观测数据比对和实地调查核实等手段验证了 CSI 方法探测结果的有效性和优势,并探讨了影响时序 InSAR 方法滑坡监测应用效果的主要因素及未来的优先研究方向。

**关键词:**滑坡;雷达差分干涉测量;时间序列 InSAR;形变测量;早期识别

**中图分类号:**P237

**文献标志码:**A

滑坡是指斜坡上的岩土体在重力作用下,沿贯通破坏面向下滑动的灾害现象,同时也指那些处于不稳定状态,有可能演化形成滑坡灾害的斜坡<sup>[1]</sup>。滑坡作为一种主要的地质灾害,广泛分布于中国山区和峡谷地带,尤其是西南高山区和三峡库区被认为是滑坡灾害发生最频繁、造成损失最惨重的地区,因此这些地区也就成为了中国滑坡灾害防治工作的重点区域。然而,这些地区的滑坡灾害往往具有隐蔽性、突发性的特点,如 2017 年 6 月 24 日发生在四川省阿坝州茂县叠溪镇的新磨村滑坡,其滑源区位于海拔 3 000 多米的高位,无法开展人工地面调查,因此该灾害隐患在灾前完全不为人所知,这使得对灾害的主动防范十分困难<sup>[2-4]</sup>。

中国《“十三五”地质灾害防治规划》明确提出,计划到 2020 年要建成系统完善的地质灾害调查评价、监测预警、综合治理、应急防治 4 大体系。要实现这一目标,就必须借助现代科技手段,特别

是充分利用遥感对地观测技术,对滑坡等地质灾害多发区域开展以普查-详查-核查为核心任务的调查评价工作,尽早识别确定潜在的灾害隐患,从而将防灾关口尽量前移<sup>[5]</sup>。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探测<sup>[6-13]</sup>,近年来其在滑坡灾害普查和监测中的巨大应用潜力已逐渐得到认知和肯定,并在白龙江流域上游和三峡库区奉节-秭归段滑坡灾害调查中得到了成功应用<sup>[14-15]</sup>。

不过,在有植被覆盖、人工目标稀少的西部山区,传统的永久散射体干涉测量(persistent scatterer InSAR, PSI)方法往往难以提取到足够数量和分布密度的稳定点目标,使得形变反演结果的可靠性差甚至出现解算错误,导致无法实现对滑坡隐患的有效判别。针对这一问题,开展了面向西部山区滑坡灾害隐患早期识别的时间序列

收稿日期:2018-09-04

项目资助:国家重点研发计划(2017YFB0502700);国家自然科学基金(61331016, 41774006, 41521002);国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB733205)。

第一作者:张路,博士,教授,主要从事雷达遥感的理论与方法研究。luzhang@whu.edu.cn

InSAR 技术方法及其应用研究。本文简要介绍了时间序列 InSAR 分析方法,通过大渡河上游丹巴县滑坡隐患识别这一典型案例,验证了时序 InSAR 技术应用于滑坡灾害普查监测的可行性和有效性,并讨论了决定该技术实际应用效能的主要影响因素。

## 1 时间序列 InSAR 分析方法

时间序列 InSAR 分析方法是在经典雷达差分干涉测量(differential InSAR, D-InSAR)技术的基础上发展起来的一类高级的 InSAR 数据处理分析方法。传统 D-InSAR 处理得到的差分干涉相位  $\Delta\varphi$  除了包含地表形变信号( $\Delta\varphi_{\text{def}}$ )以外,还混杂了地形残余误差( $\Delta\varphi_{\text{topo}}$ )、大气传播延迟( $\Delta\varphi_{\text{atm}}$ )、散射中心随机扰动( $\Delta\varphi_{\text{scatt}}$ )、热噪声( $\Delta\varphi_{\text{noise}}$ )等与形变信息无关的相位成分,如以下数学表达式<sup>[16]</sup>:

$$\Delta\varphi =$$

$$W\{\Delta\varphi_{\text{topo}} + \Delta\varphi_{\text{def}} + \Delta\varphi_{\text{atm}} + \Delta\varphi_{\text{scatt}} + \Delta\varphi_{\text{noise}}\} \quad (1)$$

式中, $W\{\cdot\}$ 表示相位缠绕运算符。正是这些相位成分的存在,使得仅利用一对干涉数据的 D-InSAR 处理难以获得高精度、高可信的形变测量结果。要提高形变测量的精度和可靠性,就必须利用多次重复轨道在稳定散射体目标上形成的冗余观测,实现形变相位与这些无关相位成分的相互分离,这就是时间序列 InSAR 分析方法的基本思想。

根据稳定散射体目标类型、影像组合方式和参数估计策略不同,可将现有的时间序列 InSAR 分析方法归纳为 3 种类型:永久散射体 InSAR (PSI)方法、小基线集(small baseline subset, SBAS) InSAR 方法和混合时序 InSAR 分析方法。PSI 方法形成于 2000 年左右,经过 10 余年发展已趋于完善,这类方法采用单一主影像组合形成序列干涉对,从中提取具有稳定散射相位的点目标,即永久散射体(persistent scatterer, PS),将识别到的 PS 点构建三角网观测网络,进而通过时空相位解缠和时空滤波来分离出各种相位成分,并解算估计线性形变速率、非线性形变序列、数字高程模型(digital elevation model, DEM)误差、大气延迟相位等参数<sup>[11,17-18]</sup>。PS 点大多依附于人造地物目标存在,因此 PSI 方法主要适用于城市场景,广泛应用于城市地面沉降和建筑物形变监测;相比之下,在自然场景中通常难以提取到

足够数量的 PS 点,因而不适用于 PSI 方法。

SBAS 方法<sup>[19-21]</sup>最早由意大利学者于 2002 年提出,经过多国学者改进,其按照短时空基线原则组合生成多主影像的序列干涉图后,首先对差分干涉相位进行空间滤波,再基于平均空间相干性识别慢失相关滤波相位像素点(slowly-decorrelating filtered phase pixel, SDFP),然后进行三维相位解缠和奇异值分解,求解单主影像相位序列,最后采用时空滤波估计和去除大气延迟相位,得到地形高程误差和形变序列信息。SBAS 方法利用的 SDFP 点实际上属于一类在短时间段内具有较强相干保持能力的分布式散射体(distributed scatterers, DS)目标,而 DS 目标在自然界中普遍存在,如沙地、裸土、草地等,因此 SBAS 方法比 PSI 方法更适用于自然场景的形变探测。

在 PSI 和 SBAS 两类方法各自发展完善的基础上,科学家们又提出了混合时序 InSAR 分析方法。该类方法通过联合分析 PS 目标与 DS 目标来增加测量点空间密度,改善形变信号空间采样率,提升相位解缠的可靠性。其基本处理流程为:首先分别按照 PSI 和 SBAS 方法提取同一场景时序 InSAR 数据集中的 PS 和 DS 目标,然后对提取到的 PS 和 DS 目标统一构网,最后采用常规 PSI 或 SBAS 时序分析方法对 PS/DS 上的相位观测进行解缠和误差分离,得到形变速率与时序形变量等信息。这类方法的典型代表包括 StaMPS/MTI (Stanford method for persistent scatterer/multi-temporal InSAR)方法<sup>[22]</sup>和 SqueeSAR<sup>TM</sup>方法<sup>[23]</sup>,后者首次提出了采用基于同质像元识别和最优相位估计的 DS 目标提取方案,大大增加了可利用的测量点数量和密度,从而显著提高了形变测量结果的有效性和可靠性。

在 SqueeSAR<sup>TM</sup>方法发表后,各国学者相继提出了多种采用类似处理策略的分布式散射体时序 InSAR 分析方法<sup>[24-29]</sup>。其中,针对 SqueeSAR<sup>TM</sup>方法应用于短序列 InSAR 数据集时性能不佳的问题,文献<sup>[30]</sup>提出了一种相干散射体时序 InSAR (coherent scatterer InSAR, CSI)分析方法。CSI 方法的基本原理和步骤如下:首先按照标准 PSI 算法,利用幅度离差等判断准则从时序 InSAR 数据集中提取候选 PS 点,基于时间相干最大化准则对候选 PS 目标进行优化筛选;然后采用广义似然比假设检验,从时序 InSAR 数据集中每个像元的空间邻域内识别与其散射特性相似度高的同质像元,将同质像元个数不少于预设阈值(大于或等于 20)的像元作为候选 DS 目标,

在此基础上采用 Phase Linking 算法对 DS 目标的干涉相位进行优化估计,提高相位观测的信噪比;最后,综合 PS 和 DS 这两类散射体目标构建基线观测网络,按照标准 PSI 的处理流程进行三维相位解缠和误差相位分离,进而解算得到形变特征参数。

## 2 实验区与实验数据

本文研究的实验区——丹巴县位于四川省甘孜州东北部,属于青藏高原东南缘横断山区邛崃山脉,境内海拔高度最低 1 700 m,最高 5 820 m,相对高差达 4 120 m,呈现典型的高山峡谷地貌。大金川河、小金川河等河流在丹巴县城汇流,下游始称大渡河。研究区域如图 1 所示,黑色矩形框表示 SAR 影像覆盖范围。丹巴县境内地质环境脆弱,崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害发生频繁。随着日益增多的人类活动,特别是大渡河梯级水电开发及相关的基建工程施工,区内地质灾害发育有加剧之势,多处滑坡复活变形,对当地居民生命财产安全构成了巨大威胁<sup>[31]</sup>。

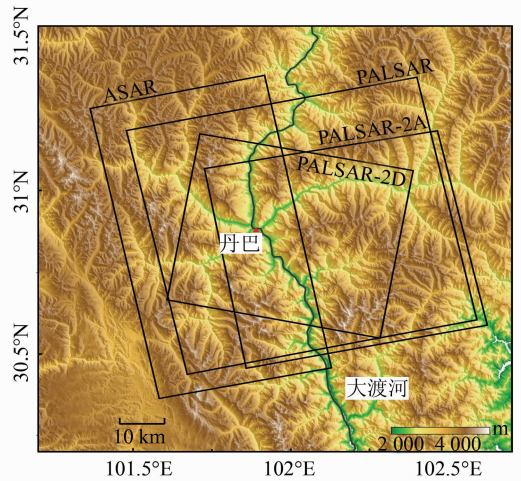


图 1 研究区域:大渡河上游四川丹巴县境内  
Fig. 1 Study Area: Danba County of Sichuan Province in the Upper Reach of Dadu River

选用的实验数据有 3 种星载 SAR 数据、参考 DEM 和 GPS 测量数据。SAR 数据包括重轨获取的 19 景 L 波段 ALOS PALSAR 数据、9 景 C 波段 ENVISAT ASAR 数据、升降轨各一对 L 波段 ALOS-2 PALSAR-2 数据。表 1 列出了这些星载 SAR 数据的基本参数信息。

表 1 丹巴实验区星载 SAR 数据基本参数

Tab. 1 Basic Parameters of Satellite SAR Datasets over Danba Area

参数	SAR 传感器		
	PALSAR	ASAR	PALSAR-2
轨道方向	升轨	升轨	升轨/降轨
雷达波长/cm	23	5.6	23
空间分辨率/m	10	20	10
重访周期/d	46	35	14
视角/(°)	34	38	32/36
影像数量	19	9	2/2
时间覆盖范围	2006-12-2011-01	2007-08-2008-06	2015-12-18 和 2016-12-16/ 2016-06-09 和 2017-06-08
垂直基线分布范围/m	-1 478~2 354	-326~60	91/124

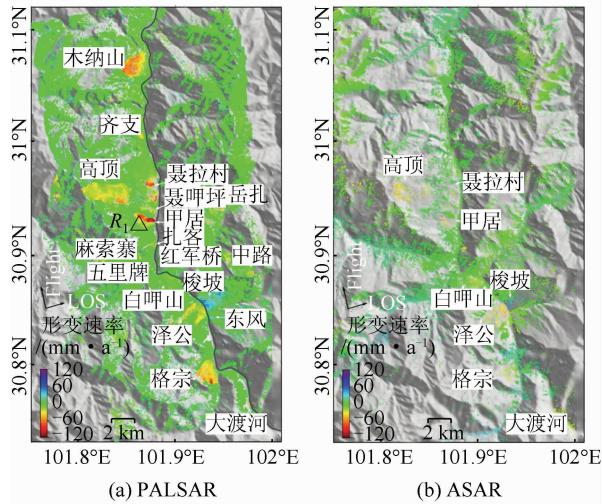
差分干涉处理选用 30 m 分辨率的 ASTER GDEM 作为参考 DEM,其标称高程精度约为 10~25 m<sup>[32]</sup>。为了定量化验证时序 InSAR 分析结果的精度,收集了成都地质矿产研究所在丹巴县甲居滑坡架的 22 个静态 GPS 观测站(包括 2 个基准站和 20 个监测站)于 2006—2013 年期间按季度采集的位移监测数据<sup>[33]</sup>。

## 3 时序 InSAR 分析结果

采用自主研发的相干散射体时序 InSAR 分析方法(CSI)对覆盖丹巴县的 PALSAR 和 ASAR 数据进行时序干涉处理,提取了 2007—

2010 年间该地区的地表形变特征信息。考虑到两种数据覆盖范围不同,而且当地居民点主要分布在河流两岸的谷地和缓坡地上,因此仅裁剪出两组数据集都覆盖的大金川河-大渡河沿线区域进行处理分析,获得的雷达视线方向(line of sight, LOS)年平均形变速率如图 2 所示。图 2 中,红色负值表示地物目标位移沿着远离卫星方向,蓝色正值表示位移朝着卫星方向,黑色三角形标示的  $R_1$  点为形变测量参考点,背景为从 ASTER GDEM 生成的山影图。

从 PALSAR 数据集中共识别出包括 PS/DS 目标在内的 4 227 593 个测量点(measurement points, MPs),平均空间分布密度大于 4 000 MPs/km<sup>2</sup>。



依据前人研究结论<sup>[34]</sup>,对于C波段 SAR 数据,当斜坡的 LOS 方向形变速率绝对值大于 2 mm/a 时,可认为该斜坡处于不稳定状态。鉴于 InSAR 形变测量精度与雷达波长成正比,对于 L 波段数据,可认为 LOS 方向形变速率大于 8 mm/a 时斜坡不稳定,该值约为 C 波段阈值的 4 倍。

PALSAR 处理结果中,约 80% 的测量点形变速率绝对值小于 8 mm/a,说明大部分区域较为稳定。从 PALSAR 平均形变速率图中总共识别出 17 处不稳定坡体,在图 2(a) 中标出了这些疑似滑坡的位置和名称,其详细特征信息见表 2。在这 17 处疑似滑坡体中,仅有甲居、梭坡和红军桥为已知滑坡,其他滑坡在本研究开展前均不为人所知。相比之下,从相同覆盖范围的 ASAR 数据集中仅探测到 776 422 个测量点,平均空间密度不足 800 MPs/km<sup>2</sup>,从中仅能识别出其中 7 处

图 2 丹巴县境内雷达视线方向平均形变速率图

Fig. 2 Mean Velocity of Surface Displacements Along Radar Line-of-Sight Directions Within Danba Area

表 2 时序 InSAR 分析滑坡探测识别结果

Tab. 2 Summary of Landslide Detection Results by Time Series InSAR Analysis

滑坡名称	坡向/(°)	坡度/(°)	面积/km <sup>2</sup>	MP 点密度/(MPs·km <sup>-2</sup> )	最大 LOS 形变速率/(mm·a <sup>-1</sup> )	可探测数据集
梭坡滑坡	220	20~30	1.1	3 659	80	A, P1, P2D
聂呷复合滑坡	110	15~30	42.5	10 898	-120	A, P1, P2A, P2D
五里牌滑坡	40	25~35	0.1	15 227	-44	P1, P2A
格宗滑坡	60	25~35	5.1	13 586	-101	A, P1, P2A
泽公滑坡	50	15~30	7.5	12 577	-63	A, P1, P2A
白呷山滑坡	10	10~30	7.6	12 896	-35	A, P1, P2A
红军桥滑坡	170	30~40	0.7	3 356	-16	P1, P2D
东风滑坡	310	15~30	0.1	3 253	25	P1, P2D
中路滑坡	300	15~35	9.1	4 574	-54	P1, P2D
岳扎滑坡	100	20~30	1.3	5 820	-56	P1, P2A
麻索寨滑坡	180	35~45	0.7	4 348	-42	P1, P2A
齐支滑坡	80	25~35	3.4	12 610	-68	P1, P2A
木纳山滑坡	120	25~40	4.8	6 259	-78	P1, P2A

注:①A、P1、P2A 和 P2D 分别代表 ASAR、PALSAR、升轨 PALSAR-2 和降轨 PALSAR-2 数据;②聂呷复合滑坡由 5 个局部滑坡(甲居、高顶、聂拉村、聂呷坪、扎客)组成;③形变速率负值表示滑坡位移远离卫星方向;④坡向以正北方向为零度,顺时针记录

滑坡,而大部分斜坡上测量点分布稀疏,无法判断斜坡稳定性。

## 4 滑坡探测识别结果的验证

针对上述时序 InSAR 分析得到的滑坡探测结果,采用以下 3 种途径来验证其有效性:①与 PALSAR-2 数据差分干涉处理结果进行定性比较;②赴实地现场调查核实;③与甲居滑坡 GPS 位移监测资料定量比对。

### 4.1 PALSAR-2 差分干涉结果比对验证

PALSAR 和 ASAR 存档数据仅能反映 2007—2010 年期间滑坡的历史活动状态,为了考察这

些滑坡近期的活动状态,使用表 1 中所列的两对 PALSAR-2 数据进行差分干涉处理,滤波后的差分干涉图如图 3 所示。为了保证较好的视觉效果,对差分干涉图不作地理编码,而是保留在雷达坐标系下。两对 PALSAR-2 数据的观测时间间隔均为 364 d,升轨和降轨干涉对的垂直基线分别为 91 m 和 124 m,对于 L 波段数据来说足够短了。短垂直基线可以保证较小的几何去相干,并可降低 DEM 误差相位的影响。从差分干涉图中可以看出,大气对流层延迟影响较小,局部的相位突变除了部分由几何畸变引起外,更多的则反映了由滑坡表面形变造成的 LOS 方向位移。

升降轨 PALSAR-2 差分干涉结果表明,利用

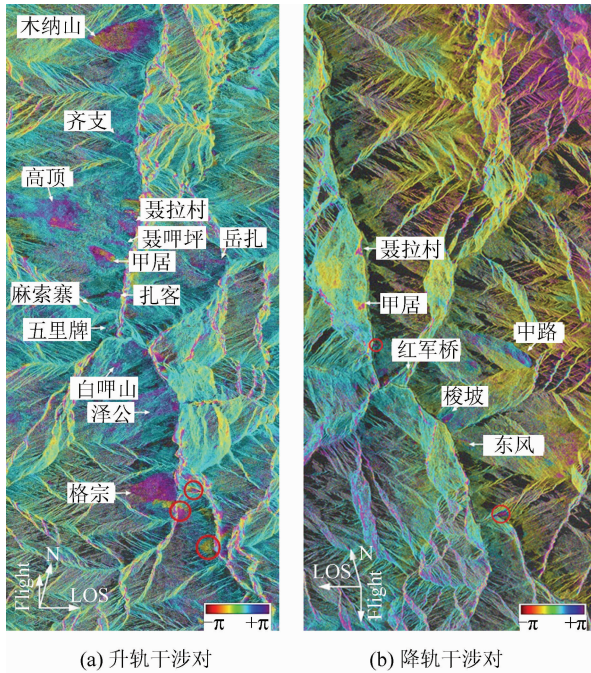


图 3 雷达坐标系下经过滤波的 PALSAR-2 差分干涉图  
Fig. 3 Filtered Differential Interferograms of PALSAR-2 in Radar Coordinate Systems

时序 InSAR 处理从历史存档 PALSAR 数据探测到的 17 处滑坡至今仍然处于活跃状态,大部分滑坡在升轨差分干涉图中可见,少部分在降轨差分干涉图中可见,如梭坡滑坡、东风滑坡、中路滑坡和红军桥滑坡,而甲居滑坡、高顶滑坡和聂拉村滑坡在升降轨干涉图中都可见。此外,PALSAR-2 差分干涉结果还探测到了一些范围较小的微弱形变信号,如图 3 中红色圈所示,这些可疑区域需要进一步现场确认和通过时序 InSAR 分析结果进行检验。

#### 4.2 实地调查核实

为了验证 InSAR 滑坡探测识别结果,973 计划项目“西部山区大型滑坡致灾因子识别、前兆信息获取与预警方法研究”于 2017 年 4 月组织了现场考察活动,对采用时序 InSAR 分析技术从 PALSAR 数据中识别出的丹巴县疑似滑坡进行现场勘查取证。本文结合 PALSAR 形变探测结果、Google Earth™ 和现场考察情况,重点分析了两个典型滑坡,以评估 InSAR 滑坡早期识别结果的可靠性。

##### 1) 聂呷复合滑坡

聂呷复合滑坡是一个巨型堆积体滑坡,东西向长为 7.4 km,南北向宽为 10 km,海拔高度范围为 1 900~4 600 m。大金川河和省道 S211 从滑坡脚下穿过。从图 4(a)所示的 PALSAR LOS 形变速率图上可以探测到 5 处局部变形区,分别

为扎客滑坡、甲居滑坡、聂呷坪滑坡、聂拉村滑坡和高顶滑坡,其中甲居滑坡和聂拉村滑坡的最大形变速率均超过了 120 mm/a,呈现强烈的变形特征。现场考察中,在甲居滑坡后缘的柏油路面发现了 10 cm 宽的裂缝,如图 4(b)所示。甲居滑坡坡脚受到大金川河水流常年冲蚀,破坏严重,这是该滑坡体持续变形的主要诱因。为此,当地政府部门采取了在坡脚河岸堆放钢筋石笼等措施进行排险加固,如图 4(c)所示。图 4(d)显示聂拉村滑坡体上道路破坏十分严重,由于变形很大,无法进行硬化处理。

扎客滑坡和聂呷坪滑坡的平均形变速率约为 20 mm/a,高顶滑坡位于山顶高位,形变速率为 20~60 mm/a。图 4(e)绘出了甲居滑坡上  $P_1$  点的形变序列及同一位置的 GPS 站点位移观测序列。为了对二者进行定量比较,将三维 GPS 位移观测矢量投影到 PALSAR 数据的 LOS 方向,并采用样条曲线插值法插值到与 InSAR 观测同步的时间点上。InSAR 与 GPS 测量结果吻合较好,相关系数为 0.98,年平均形变速率的均方根偏差为 13 mm/a。

##### 2) 五里牌滑坡

五里牌滑坡范围较小,长度为 480 m,宽度为 200 m,因近 10 余年来房地产开发等工程施工活动中对坡脚开挖,导致古滑坡复活。图 5(a)所示的时序 InSAR 探测结果表明,2007—2010 年期间,该滑坡上部形变速率明显大于下部,LOS 方向最大形变速率为 44 mm/a,滑坡上部  $P_2$  点形变序列如图 5(b)所示,整体呈线性趋势;滑坡后缘拉裂缝在现场照片中清晰可见,如图 5(c)所示;滑坡底部的挡墙也出现了若干条纵横分布的裂缝,如图 5(d)所示,说明坡脚变形已经很严重了,很可能意味着该滑坡滑动面已接近贯通,发生失稳下滑的风险较大。

五里牌滑坡的复活对山脚下居民的人身财产安全及高层建筑物稳定构成了巨大的威胁。2017 年,四川省国土厅决定采取紧急措施对该滑坡进行加固治理。采用时间序列 InSAR 技术对该滑坡开展持续跟踪监测,可为滑坡治理提供决策信息支持,并可用于评估治理后坡体的稳定性及其动态变化趋势。

#### 4.3 时序 InSAR 分析结果与 GPS 位移监测定量比较

§ 4.1 和 § 4.2 通过与 PALSAR-2 差分干涉结果比对和实地调查核实,对 PALSAR 数据的时序 InSAR 分析滑坡识别结果的有效性开展了定

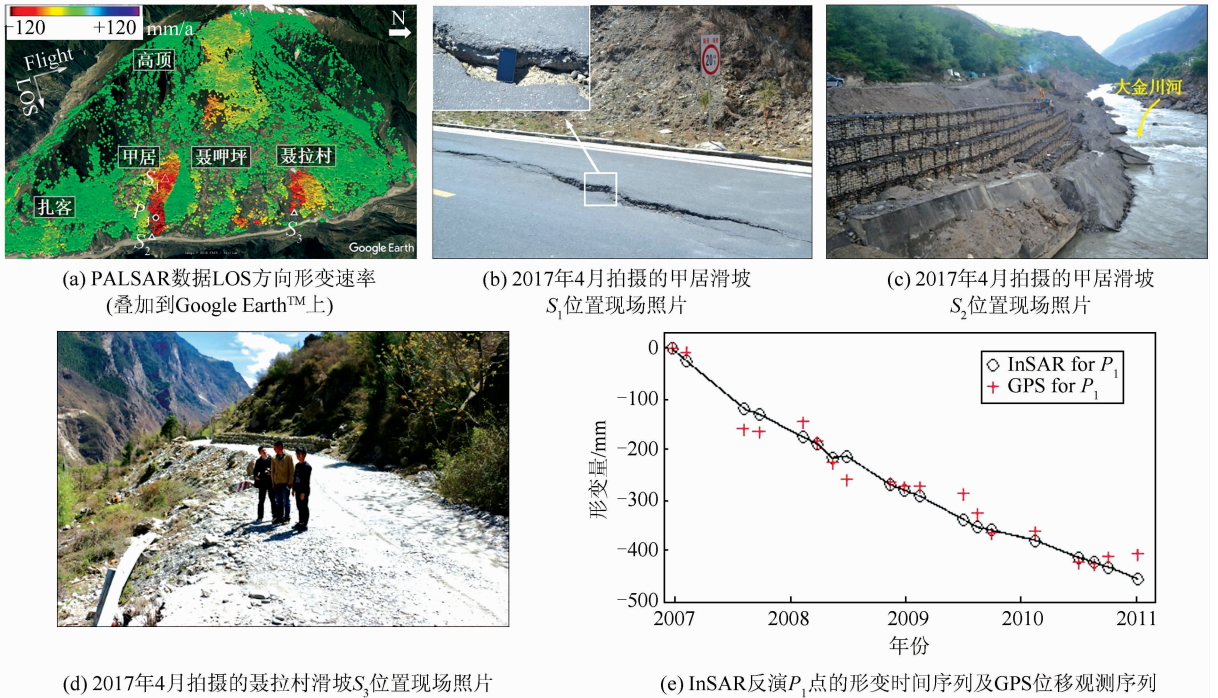


图 4 聂呷复合滑坡,包括扎客滑坡、甲居滑坡、聂呷坪滑坡、聂拉村滑坡和高顶滑坡  
 Fig. 4 Niexia Complex Landslide is Comprised of Five Landslides, Including Zhake, Jiaju, Niexiaping, Nielacun and Gaoding

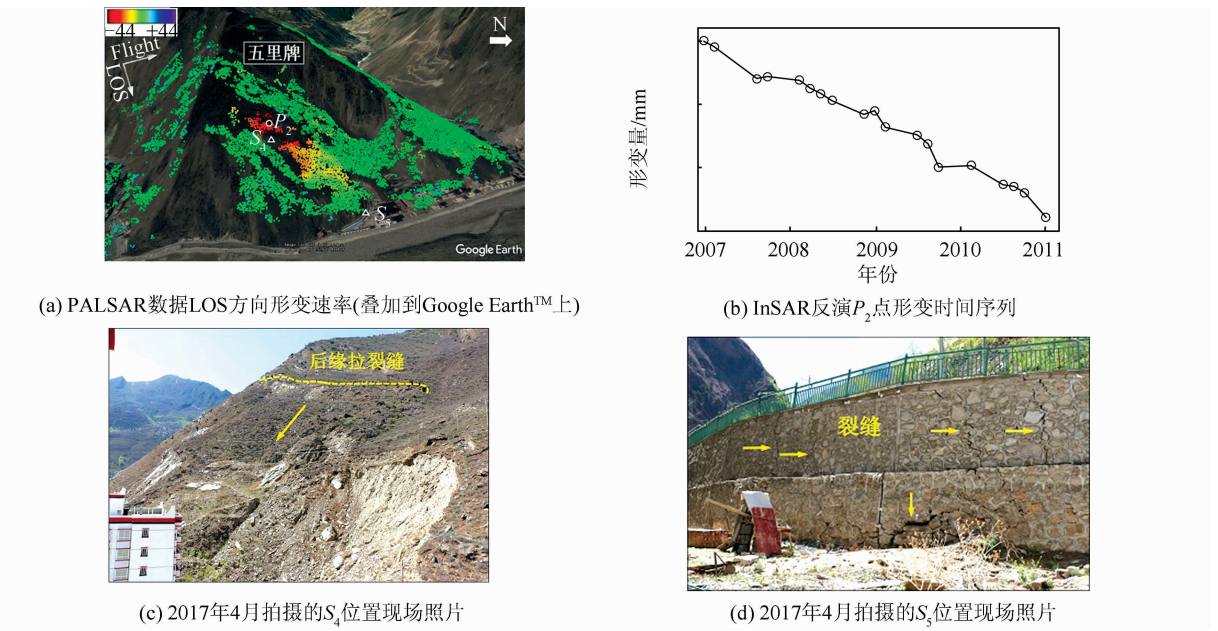


图 5 五里牌滑坡  
 Fig. 5 Wulipai Landslide

性评价和验证。本节利用甲居滑坡上安装的 20 个 GPS 观测站点获取的 2006—2013 年间滑坡表面位移监测资料,对 InSAR 滑坡形变探测结果进行定量评价。

为了方便比对,将 GPS 测量的三维位移矢量投影到 PALSAR 数据的 LOS 方向。以每个 GPS 监测站为中心,计算半径 50 m 以内所有 InSAR

测量点的平均形变速率和形变时间序列。对 InSAR 平均形变速率与投影后的 GPS 平均形变速率作统计相关分析,二者构成的散点图如图 6 所示,相关系数为 0.969,吻合度较高,二者之间偏差的均方根 (root mean square error, RMSE) 为 10.5 mm/a,相对于上百 mm/a 量级的甲居滑坡平均形变速率来说,这一偏差已经很小了。

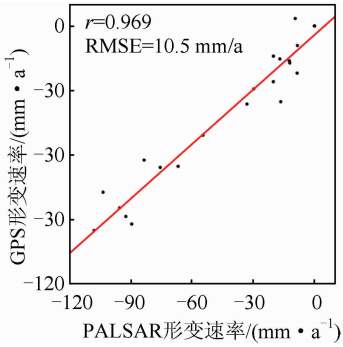


图 6 PALSAR 与 GPS 观测形变速率散点图  
Fig. 6 Scatter Plot of Displacement Velocities Measured by PALSAR and GPS

对比了 20 个 GPS 监测站上 InSAR 和 GPS 的累积形变序列。将 2006 年 12 月 23 日作为 InSAR 和 GPS 形变序列统一的参考零基准时间,计算各观测时刻的累积形变量。作为示例,图 7 给出了其中有代表性的 4 个 GPS 站点 InSAR 与 GPS 的累积形变序列, $\Delta$  为 GPS 与 InSAR 测量平均形变速率之差。在选取的 4 个 GPS 站点中,G5 位于滑坡体北侧上部靠近后缘处,G9 在整个滑坡体中部偏北侧,G15 位于滑坡体南侧下部靠近前缘处,G17 位于滑坡体北侧下部靠近前缘处。从形变序列来看,甲居滑坡呈现前缘比后缘变形更快、北侧比南侧滑动变形更强烈的空间分布格局。

在大部分监测站点上,InSAR 与 GPS 形变序列的趋势一致性较好。具体地,20 个 GPS 站点中有 13 个站点的速率差值小于 10 mm/a,4 个站点的速率差值在 10~15 mm/a,仅有 3 个站点(G12、G18 和 G22)的速率差值超过 15 mm/a。不过,尽管 InSAR 与 GPS 测量的形变趋势吻合度较高,但二者仍然存在一定偏差。可能导致偏差的原因包括:① InSAR 测量点与 GPS 监测站位置不重合,甲居滑坡空间形变梯度较大,几十米的距离偏差可能会导致较大的形变量差异;② PALSAR 数据观测获取时间与 GPS 测量采集时间不同步,滑坡形变并非理想的线性形变,也会导致偏差。

## 5 结果分析与讨论

§ 4 通过多种途径对 PALSAR 数据时间序列 InSAR 分析结果的验证表明,时序 InSAR 技术应用于大渡河上游丹巴县能够有效地识别处于持续变形中的不稳定坡体。但其应用效能还取决于使用的数据、采用的处理方法、针对的研究对象

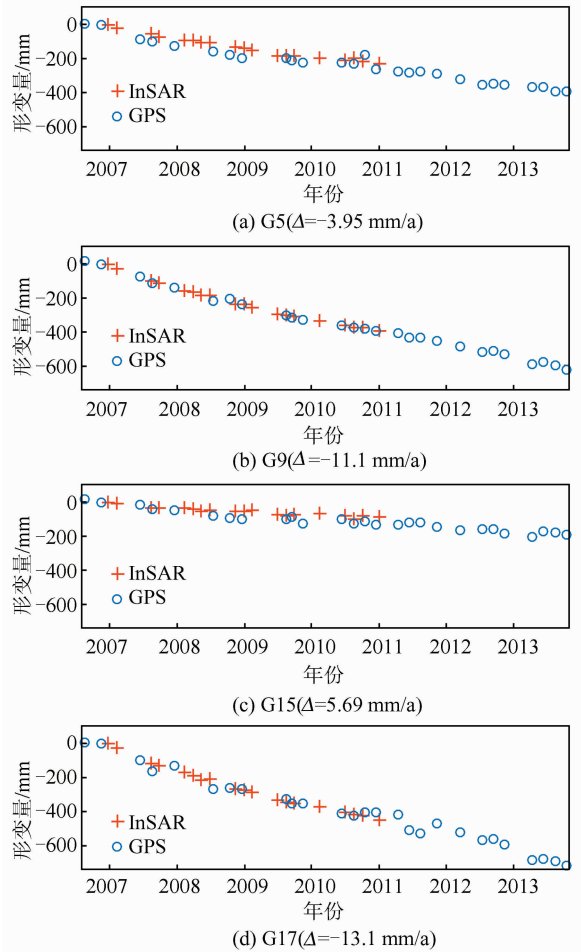


图 7 代表性 GPS 站点 InSAR 与 GPS 测量累积形变序列图

Fig. 7 Cumulative Displacements at Typical GPS Stations Measured by InSAR and GPS

及环境条件等,本节将对此展开讨论分析。

### 5.1 不同时序 InSAR 分析结果的结果比较

以甲居滑坡为例,分别采用 PSI、SBAS 和本文提出的 CSI 这 3 种时序 InSAR 分析方法对 PALSAR 数据集进行了处理,得到的平均形变速率图如图 8 所示。很显然,SBAS 方法提取到的测量点密度(1 329 MPs/km<sup>2</sup>)略高于 PSI 方法的提取结果(823 MPs/km<sup>2</sup>),而 CSI 方法得到的测量点密度(25 533 MPs/km<sup>2</sup>)远高于其他两种方法。

PSI 和 SBAS 方法提取的测量点数量偏少而且分布很不均匀,特别是在滑坡下部大片区域仅有很稀疏的有效测量点,导致相位解缠错误,进而造成形变速率的低估。相比之下,CSI 方法提取到的测量点数量高很多,而且分布更为均匀,因此保证了滑坡下部大形变区域相位的正确解缠,避免了形变速率的低估问题。另外,从 CSI 处理结果中不难看出,甲居滑坡北侧不稳定的区域大大

超过了由前人研究给出的滑坡边界(黑色曲线)<sup>[35]</sup>,根据CSI得到的平均形变速率分布图,甲

居滑坡北侧边界(即滑坡后缘)应该更新定位到向后600 m处。

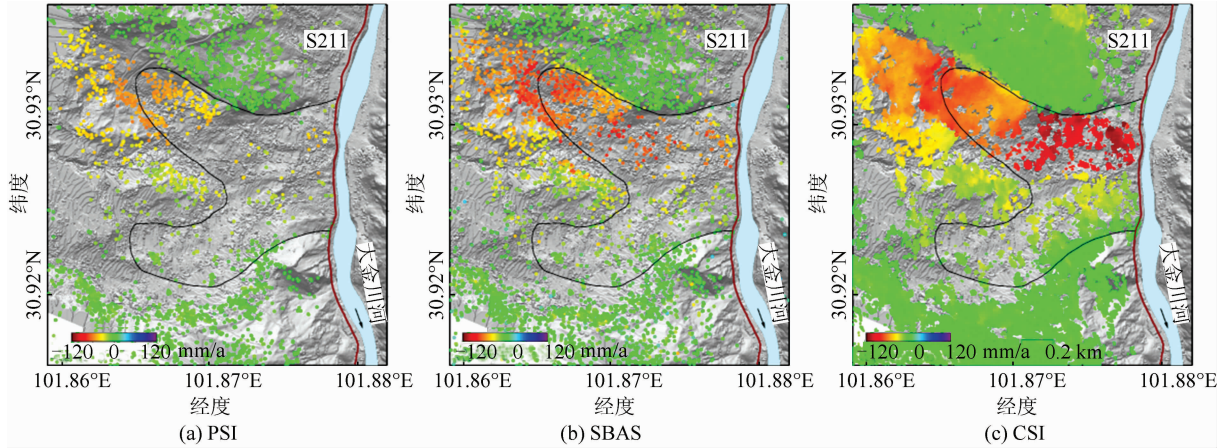


图8 3种时序InSAR分析方法得到的甲居滑坡平均形变速率图

Fig. 8 Mean Displacement Velocities of Jiayu Landslide Derived by Three Time Series InSAR Methods

## 5.2 时序InSAR滑坡识别影响因素分析

大渡河上游丹巴县的实验结果证明了CSI方法在滑坡早期识别中的有效性及优势,具备了在西部山区大范围推广应用的潜力,但其实际应用效果受到以下因素的影响。

### 1) 雷达波长

现有的民用雷达卫星通常工作于X波段(波长3.1 cm)、C波段(波长5.6 cm)或L波段(波长23.6 cm)。对于InSAR形变测量来说,雷达波长决定测量灵敏度,波长越短,灵敏度越高,反之波长越长,灵敏度越低。但在复杂山区环境中,特别是在植被覆盖情况下,短波长的X波段和C波段难以穿透植被冠层,时间相干性保持能力弱;波长更长、穿透能力更强的L波段,InSAR观测数据往往具有更好的相干性,在西部山区滑坡普查监测应用中具有明显优势。

### 2) 几何畸变

星载SAR系统采用的侧视距离成像方式在观测山区时容易产生几何畸变现象,造成无效的观测盲区。一般来说,朝向卫星的斜坡在雷达影像中形成透视收缩或叠掩的概率较大,多个分辨单元的散射回波信号相互混叠,使得难以提取到有效的形变信息;而背向卫星的斜坡处于有利观测条件,成像分辨率较高,更适合于探测坡体稳定性。不过,几何畸变的程度取决于传感器与斜坡的相对几何关系,与雷达入射角、坡向、坡度等特征参数密切相关。通过加大入射角,可有效减少透视收缩和叠掩现象,但可能会以增加阴影的产生为代价。此外,联合升轨和降轨观测可大大减少观测盲区,提升滑坡的有效探测率。

### 3) 一维形变

InSAR技术仅能探测到沿着雷达视线(即LOS方向)的一维形变,民用雷达卫星均为沿近南北方向飞行的极轨卫星,使得星载InSAR观测仅对东西和垂直方向的形变敏感,而当滑坡的主要位移方向与LOS方向近似垂直时,InSAR难以有效探测其形变信息。对于工程地质应用来说,通常需要完整的三维形变信息才能对滑坡状态作出全面准确的判断。因此,联合多平台、多轨道观测数据或与多孔径干涉测量、偏移量追踪等不同方法联合提取三维形变场已成为InSAR技术领域的研究热点之一<sup>[36-37]</sup>。

### 4) 最大可探测形变梯度

基于相位观测的InSAR技术能够探测的空间形变梯度和时间形变速率是有上限的。可靠的相位解缠要求空间上相邻测量点之间的相对形变差值不超过雷达波长的1/4(即 $\lambda/4$ )。最大时间形变速率除了与空间形变梯度有关外,还取决于SAR数据采集的时间间隔 $\Delta t$ ,表达式为 $\lambda/(4\Delta t)$ <sup>[38]</sup>。长波段传感器和高空间分辨率可同时提升可探测的最大空间形变梯度和最大时间形变速率,短重访周期能够提升最大时间形变速率。值得注意的是,形变量较大很可能引起时间失相干,使得无法提取到相干散射体。对于超出最大可探测梯度的滑坡形变现象,通常可采用子带干涉或偏移量追踪等方法进行探测提取<sup>[39-40]</sup>。

### 5) 大气对流层传播延迟效应

对于重复轨道InSAR技术来说,由大气对流层中水汽含量分布的时空变化引起的雷达回波传播延迟构成了差分相位测量中的主要误差源,因此对大气延迟相位进行定量估计和补偿是形变信息提取过程中的重要环节之一。经典的时间序列



InSAR 分析方法通常假定大气延迟相位是一种空间上高度自相关、时间上随机分布的信号,因而采用时间维高通、空间维低通的组合滤波器来加以估计。

然而,这一假设条件仅适用于地形较为平坦的区域,在类似大渡河流域的高山峡谷地区,与地形起伏相关的对流层垂直分层延迟相位往往占据主导地位,而且具有时间相关性并呈现季节性波动的趋势,使得采用传统的时空滤波手段难以对其进行准确估计和去除。因此,高山峡谷地区大气延迟相位的有效估计和去除已成为时序 InSAR 技术应用于山区滑坡灾害普查监测中的主要瓶颈,亟需开展相应的方法研究<sup>[41]</sup>。

## 6 结 语

中国西部山区地质环境破碎,地质构造活动频繁,气象条件复杂多变,因此滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害广泛发育,对当地居民生命财产安全和社会经济可持续发展构成了严重威胁。要预防减少滑坡等灾害发生可能造成的损失,最有效的途径是尽可能早地发现、识别和确定具有成灾风险的地质灾害隐患,为进一步开展监测预警、综合治理或搬迁避让提供决策信息支持。

利用星载 SAR 系统重复轨道获取的观测数据集进行时间序列 InSAR 分析,可为滑坡灾害隐患的早期识别提供有效的技术手段。本文以大渡河上游丹巴县为实验区,探讨了时序 InSAR 分析方法在滑坡早期识别中的应用潜力。采用相干散射体干涉测量(CSI)方法,从历史存档的 L 波段 ALOS PALSAR 数据集中成功探测识别出了 17 处不稳定坡体,通过将疑似滑坡识别结果与 PALSAR-2 差分干涉结果和 GPS 位移监测资料比对、实地调查核实等途径,评估验证了时序 InSAR 方法用于滑坡隐患识别的有效性及其优势,并总结了影响时序 InSAR 方法滑坡监测应用效果的主要因素以及需要继续探索的研究方向。

致谢:本研究中使用的 ALOS PALSAR 和 ALOS-2 PALSAR-2 数据由日本宇航局 ALOS RA 项目(1247, 1440, 3248)提供,ENVISAT ASAR 数据由中欧合作“龙”计划项目(32278)提供。

## 参 考 文 献

[1] Huang Runqiu, Xu Qiang. Catastrophic Landslide Disasters in China [M]. Beijing: Science Press,

- 2008 (黄润秋, 许强. 中国典型灾难性滑坡 [M]. 北京: 科学出版社, 2008)
- [2] Xu Qiang, Li Weile, Dong Xiujun, et al. The Xinmocun Landslide on June 24, 2017 in Diexi Maoxian, Sichuan: Characteristics and Failure Mechanism [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 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, 11: 2 612-2 628)
- [3] Yin Yueping, Wang Wenpei, Zhang Nan, et al. Long Runout Geological Disaster Initiated by the Ridge-Top Rockslide in a Strong Earthquake Area: A Case Study of the Xinmo Landslide in Maoxian County, Sichuan Province [J]. *Geology in China*, 2017, 44(5): 827-841 (殷跃平, 王文沛, 张楠, 等. 强震区高位滑坡远程灾害特征研究——以四川茂县新磨滑坡为例 [J]. 中国地质, 2017, 44(5): 827-841)
- [4] Su L, Hu K, Zhang W, et al. Characteristics and Triggering Mechanism of Xinmo Landslide on June 24 2017 in Sichuan, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(9): 1 689-1 700
- [5] Xu Qiang, Tang Minggao, Huang Runqiu. Monitoring, Early Warning and Emergency Disposal of Large Landslides [M]. Beijing: Science Press, 2015 (许强, 汤明高, 黄润秋. 大型滑坡监测预警与应急处置 [M]. 北京: 科学出版社, 2015)
- [6] Guo Huadong. Theory and Application of Earth Observation by Radar [M]. Beijing: Science Press, 2000 (郭华东. 雷达对地观测理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2000)
- [7] Liao Mingsheng, Wang Teng. Time Series InSAR Technology and Its Applications [M]. Beijing: Science Press, 2014 (廖明生, 王腾. 时间序列 InSAR 技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014)
- [8] Liao Mingsheng, Zhang Lu, Shi Xuguo, et al. Methodology and Practice of Landslide Deformation Monitoring with SAR 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)
- [9] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic Aperture Radar Interferometry [J]. *Proc of IEEE*, 2000, 88(3): 333-382
- [10] Hooper A, Bekaert D, Spaans K, et al. Recent Advances in SAR Interferometry Time Series Analysis for Measuring Crustal Deformation [J]. *Tectonophysics*, 2012, 514: 1-13
- [11] Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-González M, et al. Persistent Scatterer Interferometry: A Re-

- view [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 115: 78-89
- [12] 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 and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(8): 945-950 (杨成生, 张勤, 赵超英, 等. 短基线集 InSAR 技术用于大同盆地地面沉降、地裂缝及断裂活动监测 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(8): 945-950)
- [13] 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): 1 195-1 202 (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): 1 195-1 202)
- [14] Zhang Y, Meng X, Chen G, et al. Detection of Geohazards in the Bailong River Basin Using Synthetic Aperture Radar Interferometry [J]. *Landslides*, 2016, 13(5): 1 273-1 284
- [15] Shi X, Liao M, Li M, et al. Wide-Area Landslide Deformation Mapping with Multi-path ALOS PALSAR Data Stacks: A Case Study of Three Gorges Area, China [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(2): 136
- [16] Hanssen R F. Radar Interferometry, Data Interpretation and Error Analysis [M]. Netherlands: Springer, 2001
- [17] 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): 2 202-2 212
- [18] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8-20
- [19] 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): 2 375-2 383
- [20] Mora O, Mallorqui J J, Broquetas A. Linear and Nonlinear Terrain Deformation Maps from a Reduced Set of Interferometric SAR Images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(10): 2 243-2 253
- [21] Lanari R, Mora O, Manunta M, et al. A Small-Baseline Approach for Investigating Deformations on Full-Resolution Differential SAR Interferograms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(7): 1 377-1 386
- [22] Hooper A. A Multi-temporal InSAR Method Incorporating Both Persistent Scatterer and Small Baseline Approaches [J]. *Geophysical Research Letter*, 2008, 35: L16302
- [23] Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, et al. A New Algorithm for Processing Interferometric Data Stacks: SqueeSAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(9): 3 460-3 470
- [24] Wang Y, Zhu X, Bamler R. Retrieval of Phase History Parameters from Distributed Scatterers in Urban Areas Using very High Resolution SAR Data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 73(9): 89-99
- [25] Goel K, Adam N. A Distributed Scatterer Interferometry Approach for Precision Monitoring of Known Surface Deformation Phenomena [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(9): 5 454-5 468
- [26] Lv X, Yazici B, Zeghal M, et al. Joint-Scatterer Processing for Time-Series InSAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(11): 7 205-7 221
- [27] Ng A H M, Ge L, Li X. Assessments of Land Subsidence in the Gippsland Basin of Australia Using ALOS PALSAR Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 159: 86-101
- [28] Fornaro G, Verde S, Reale D, et al. CAESAR: An Approach Based on Covariance Matrix Decomposition to Improve Multibaseline-Multitemporal Interferometric SAR Processing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(4): 2 050-2 065
- [29] Cao N, Lee H, Jung H C. A Phase-Decomposition-Based PSInSAR Processing Method [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(2): 1 074-1 090
- [30] Dong J, Zhang L, Tang M, et al. Mapping Landslide Surface Displacements with Time Series SAR Interferometry by Combining Persistent and Distributed Scatterers: A Case Study of Jiaju Landslide in Danba, China [J]. *Remote Sensing of Environment* 2018, 205: 180-198
- [31] Li Minghui, Zheng Wanmo, Chen Qiguo. Development Characteristic of Geological Hazard in Danba County and Its Cause Discussion [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2008, 17(1): 49-53 (李明辉, 郑万模, 陈启国. 丹巴县地质灾害发育特征及成因探讨[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(1): 49-53)

- [32] Fujisada H, Bailey G B, Kelly G G, et al. ASTER DEM Performance [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(12): 2 707-2 714
- [33] Ao Meng, Zhang Qin, Zhao Chaoying, et al. An Improved CR-InSAR Technology Used for Deformation Monitoring in Jiaju Landslide, Sichuan [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(3): 377-383 (敖萌, 张勤, 赵超英, 等. 改进的 CR-InSAR 技术用于四川甲居滑坡形变监测 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2017, 42(3): 377-383)
- [34] Colesanti C, Wasowski J. Investigating Landslides with Space-Borne Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry [J]. *Engineering Geology*, 2006, 88(3): 173-199
- [35] Yin Y, Zheng W, Liu Y, et al. Integration of GPS with InSAR to Monitoring of the Jiaju Landslide in Sichuan, China [J]. *Landslides*, 2010, 7(3): 359-365
- [36] Hu J, Li Z W, Ding X L, et al. Resolving Three-Dimensional Surface Displacements from InSAR Measurements: A Review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 133: 1-17
- [37] 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): 1 015-1 027
- [38] Wasowski J, Bovenga F. Investigating Landslides and Unstable Slopes with Satellite Multi Temporal Interferometry: Current Issues and Future Perspectives [J]. *Engineering Geology*, 2014, 174: 103-138
- [39] Shi X, Zhang L, Balz T, et al. Landslide Deformation Monitoring Using Point-Like Target Offset Tracking with Multi-mode High-Resolution TerraSAR-X Data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 105: 128-140
- [40] 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
- [41] Bekaert D P S, Walters R J, Wright T J, et al. Statistical Comparison of InSAR Tropospheric Correction Techniques [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 170:40-47

## Early Detection of Landslide Hazards in Mountainous Areas of West China Using Time Series SAR Interferometry—A Case Study of Danba, Sichuan

ZHANG Lu<sup>1</sup> LIAO Mingsheng<sup>1</sup> DONG Jie<sup>1,2</sup> XU Qiang<sup>3</sup> GONG Jianya<sup>2,1</sup>

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

2 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

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

**Abstract:** As the most frequent and devastating geohazard next to earthquakes, landslides are widely distributed in mountainous areas of west China, which makes early detection of landslides a vital task for geologic disaster prevention. Although time series SAR interferometry (InSAR) based on repeat-pass satellite SAR observations has shown a great potential in landslide detection, its performance is usually limited by factors such as vegetation coverage, which leads to low reliability of detection results. Aiming at this problem, we carry out a case study by employing the coherent scatterer InSAR (CSI) method to successfully detect 17 unstable slopes in Danba County in the upper reach of Dadu River Basin from archived ALOS PALSAR and ENVISAT ASAR datasets. The effectiveness and advantage of the CSI method are demonstrated by comparisons with other observation data as well as validation against field survey. And, major impact factors for the performance of time series InSAR analysis in landslide investigations and future research topics of high priority are summarized.

**Key words:** landslide; D-InSAR; time series InSAR; deformation measurement; early detection

**First author:** ZHANG Lu, PhD, professor, specializes in the theories and methods of radar remote sensing. E-mail: luzhang@whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFB0502700; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 61331016, 41774006, 41521002; the National Key Basic Research Program (973 Program) of China, No. 2013CB733205.