

# InSAR技术在滑坡灾害中的应用研究进展

李晓恩<sup>1,2,3,4</sup>, 周亮<sup>1,2,3,4</sup>, 苏奋振<sup>2,5</sup>, 吴文周<sup>2,5</sup>

1. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院, 兰州 730070;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

3. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 兰州 730070;

4. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 兰州 730070;

5. 中国南海协同创新研究中心, 南京 210023

**摘要:** InSAR技术作为重要的对地观测技术之一, 已在城市、矿山、地质灾害等地表形变监测领域得到广泛应用与探索, 特别是在滑坡灾害形变监测中具有很强的实用性。为全面、准确及深入认识和梳理InSAR技术在滑坡灾害应用中的前沿科学问题、局限性、面临挑战及未来发展趋势, 以期更好地服务于滑坡灾害的防治与监测。以InSAR技术滑坡灾害应用研究为主要脉络, 系统阐述其研究进展: (1) 以滑坡监测中应用的主要InSAR方法概述为切入点, 系统梳理了各类主要方法的适用范围、优缺点及内在联系; (2) 基于早期识别探测、不同量级形变监测、活动模式与三维信息获取、形变与诱因耦合4个视角, 深入探析InSAR技术在滑坡应用中的最新进展、趋势及目前应用中存在的关键问题与挑战; (3) 针对InSAR技术系统的局限性、滑坡灾害的特点, 剖析了InSAR滑坡监测中存在的几何畸变、密集植被覆盖、大气干扰、三维形变信息获取、精度评定、滑坡形变的复杂性和非线性等问题, 并对相应问题的解决提供了可行性的方案与建议措施; (4) 基于InSAR滑坡行业体系构建的视角, 结合人工智能(AI)、机器学习、无人机遥感及地学领域地震台网等其他观测技术, 从数据处理、与其他新技术融合对未来InSAR在滑坡应用研究进行总结和展望。

**关键词:** 遥感, InSAR技术, 山体滑坡, 地质灾害, 形变监测, 研究进展

**引用格式:** 李晓恩, 周亮, 苏奋振, 吴文周. 2021. InSAR技术在滑坡灾害中的应用研究进展. 遥感学报, 25(2): 614-629

Li X E, Zhou L, Su F Z and Wu W Z. 2021. Application of InSAR technology in landslide hazard: Progress and prospects. National Remote Sensing Bulletin, 25(2): 614-629 [DOI: 10.11834/jrs.20209297]

## 1 引言

滑坡是经地质构造、降雨等内外因素共同作用而触发的复杂地质演化过程。频发、广泛分布的滑坡及其链式灾害, 严重影响区域水能资源开发、新型城镇化建设、铁路公路交通干线等国家重大工程建设与运营, 是人类生产生活永续发展的重大威胁(邓建辉等, 2019)。受全球气候变化、快速工业化与城镇化的扰动, 冰川融化、强降雨等因素诱发的滑坡灾害不断增加, 例如2017年四川茂县特大型滑坡和2018年西藏金沙江高位山体滑坡等。全球范围内意大利、瑞士、日本等国在滑坡地质灾害防治、调查监测技术实施、灾害

风险管理框架制定等方面处于领先地位, 积累了很多值得借鉴的宝贵经验和技術方法。“汶川地震”以来, 国内高度重视地质灾害的持续跟踪监测与研究, 陆续开展了一系列利用现代新型对地观测技术进行灾害风险调查、隐患排查、早期识别与预警的探讨、实践。2017年—2019年许强、张勤团队在贵州兴义、甘肃黑方台数次成功的滑坡预警案例表明, 有关滑坡灾害的研究正从灾后观测分析向实时监测、灾前风险预警逐步转型, 进而将防灾关口前移。其中, 形变监测是滑坡灾害识别预警、决策管理中最直接、有效的途径, 通过监测坡体变形可评估其稳定性和反映运动状态(Michoud等, 2016)。传统的滑坡监测方法有水准

收稿日期: 2019-08-20; 预印本: 2020-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41961027, 41701173); 甘肃飞天学者特聘计划; 兰州交通大学优秀平台支持(编号:201806)

第一作者简介: 李晓恩, 1994年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为InSAR地表形变监测应用。E-mail: xiaoenli4816@gmail.com

通信作者简介: 周亮, 1983年生, 男, 教授, 研究方向为城市遥感与区域可持续发展。E-mail: zhougeo@126.com

仪、GPS观测站、裂缝计等,然而传统手段只能满足局域范围内已探明滑坡点监测,并存在效率低、易受外界条件制约、无法准确反映区域尺度滑坡形态整体变化特征及趋势,尤其对人迹罕至区域高位远程、高隐蔽性滑坡更显得无能为力。因此,在一定区域空间尺度上采用高效、便捷的对地观测技术是滑坡地质灾害防治中的重要内容之一。

遥感远距离、非接触、多维宏观视角的特点,为地质灾害风险预警与管理提供了强有力支撑,特别是其主动微波遥感中的合成孔径干涉雷达InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar)技术。凭借其全天候、强穿透性、高精度获取连续覆盖地面高程和信息的突出优势,已在地表形变监测、灾害评估等相关领域得到广泛应用(范一大等, 2016; Carlá等, 2019; 刘国祥等, 2019b)。相比于光学遥感, InSAR能很好地定量监测、表征地表自然环境形态变化,揭示地表缓慢移动过程和潜在危险事件,是传统光学遥感和常规地面观测技术手段的有益补充(Strozzi等, 2018)。更重要的是InSAR以其高密度测量点、更短重访周期,可实现广域范围内地表形变监测对象的精细化表达与刻画。通过InSAR获取的滑坡形变信息,对于掌握坡体形变演化过程、发生机理机制、活动性滑坡早期识别预警而言非常重要(廖明生等, 2017)。历经几十年InSAR在滑坡灾害中的持续应用与探索, InSAR已发展为滑坡监测中强有力的空间大地测量技术,被广泛应用于滑坡早期识别、形变监测、活动模式三维信息获取、诱因分析等领域。为进一步了解InSAR滑坡应用研究进展、局限性与挑战及未来发展趋势。研究将从InSAR滑坡监测主要方法概述、适用范围及优缺点比较; InSAR滑坡应用研究主要专题内容论述; InSAR滑坡研究局限性与展望几个方面进行详实阐述。以期能够对近些年InSAR在滑坡中的应用研究有系统、全面、深入的认识与理解,进一步深化其在滑坡探测和监测方面的应用和推广。

## 2 滑坡灾害监测中的InSAR方法

InSAR是大区域滑坡监测中最高效的对地观测技术,其主要监测方法包括:差分干涉测量DInSAR (Differential InSAR)、多时相MT InSAR (Multi Temporal InSAR)以及像素偏移量分析POT (Pixel Offset Tracking)、地基合成孔径干涉雷达

GBInSAR (Ground-based InSAR)、多孔径干涉测量MAI (Multi Aperture InSAR)等其他方法。合理认识各类方法的特点是科学设计InSAR滑坡应用监测方案的重要环节,各类方法分析如下。

### 2.1 DInSAR

DInSAR是在传统InSAR基础上发展起来,利用同一地区不同时刻获取SAR数据进行差分干涉处理,通过差分处理去除两次观测相位中的共有量(平地效应、地形相位和大气延迟等)得到形变相位,进而获得地表形变信息。DInSAR在滑坡监测中可以估计沉降边界范围,还可以解析沉降演化过程,获取滑坡整体活动范围和强度(Rott等, 1999)。Fruneau等(1996)首次成功将DInSAR技术应用于法国南部Saint-Étienne-de-Tinée滑坡监测中,处理结果与常规离散观测高度吻合,验证了其监测的可靠性。

### 2.2 MT InSAR

DInSAR虽能有效探测地表微小形变,但因其监测精度易受干涉失相干、大气延迟影响,且地表移动速率不能超过一定阈值(Zebker等, 1997),因此MT InSAR应运而生。MT InSAR序列中以永久散射点干涉测量PSInSAR (Persistent Scatterers InSAR)和小基线集干涉测量SBASInSAR (Small Baseline Subset InSAR)为代表(Lanari等, 2004, 2007; 林琿等, 2017)。两种方法比较适合于监测长期缓慢累积形变滑坡,并且能获得坡体活动模式信息。其中,PSInSAR是以高相干性像元组成的离散点集PS (Persistent Scatter)点处理为主,对PS点进行相位建模和形变解算。Ferretti等(2000)运用PSInSAR提取了滑坡位移速率,验证其具有探测毫米精度位移能力。以PSInSAR单一主影像为起源,发展起来的方法有:用于监测滑坡断层形变的准(或部分)永久散射体QPS (Quasi PS)方法;联合PS及分布式DS (Distributed Scatterer)相位信号,应用经典PSInSAR分析方法分离相位中各个成分,提取形变信息的分布式永久散射体雷达监测技术SqueeSAR方法等。然而,非城镇地区大部分像元相位并不主要受单一强散射体控制,相位变化极易超出PS识别阈值范围(Hooper等, 2007)。因此,后提出的SBASInSAR方法通过采用多主影像组合方式,来限制干涉对

空间基线来提高相干性和形变探测精度 (Schmidt 和 Bürgmann, 2003)。该组合方式可以提取一定时间内保持相干性的分布式点目标, 进一步提高了点密度, 非常适用于自然地表形变监测, 能在区域尺度上实现长时序、毫米级形变监测, 广泛用于滑坡识别、监测和评价等领域。另外, 以多主影像理念为基础, 提出的有时域相干点目标方法 TCPIInSAR (Temporarily Coherent Point InSAR)、相干目标干涉测量 CT (Coherent Target InSAR) 等。

除上述 InSAR 方法外, 应用于滑坡监测的其他方法如下: 能监测大形变, 利用 SAR 幅度信息, 并通过升、降轨数据可获取三维形变场的 POT (POT 方法未进行相位干涉, 理论上不属于 InSAR

技术, 但在滑坡中有重要应用, 为体现方法体系的完整性, 对其进行论述); 可满足灾害现场及大型人工基础设施如大坝、桥梁等实时远程监测的 GBInSAR; 作为 DInSAR 测量结果的有益补充, 并能获取地表方位向形变的 MAI 及测量大梯度形变的距离向分频干涉测量 RSSI (Range Split-Spectrum Interferometry)。上述方法的提出进一步拓展和完善了 InSAR 所能监测滑坡的范围、类型, 为不同区域构造、不同形变特征滑坡监测提供了全方位方法的支撑。综上, 表 1 梳理了目前滑坡地质灾害监测研究中应用的重要 InSAR 方法, 对其进行简要分类、探讨了各自在形变监测领域内的主要应用范围及优缺点。

表 1 InSAR 技术方法比较

Table 1 The comparison of InSAR techniques and methods

技术方法	算法主要提出者	监测领域/范围	优点	缺点
DInSAR	Gabriel 等, 1989; Massonnet 等, 1993; Massonnet 和 Rabaute, 1993; Zebker 等, 1994; Wegmuller 等, 1998	大范围: 火山、地震; 局域: 矿区、滑坡、油 气田、冰川、冻土及城 市地表	覆盖范围广、数据量少 成本低、安全和观测连续、 应用广泛、监测精度为厘米至分 米级	易受时空失相干、大气效应制约 对时空基线有一定要求、不适用于缓 慢形变 监测结果受 DEM 影响、无法得到时序 数据
PSInSAR	Ferretti 等, 2000, 2001	开采沉降、城市基础 设施、滑坡、地震形 变、高铁沿线	精度达毫米、亚毫米级别 对 DEM、时空基线要求不高、适合监 测城区 可以精确的估计和消除大气效应对 相位的贡献	形变解算精度依赖于 PS 点的空间 密度 数据多、运算效率低、需选择最优主 影像 不适合大范围监测应用、线性形变模 型假设
SBASInSAR	Berardino 等, 2002	火山、矿区、冻土、城 市、断层滑动滑坡地 表形变	无需考虑时空基线、主影像选择 问题 影像需求量比 PSInSAR 低、运算效 率较高 监测精度可达毫米级别、可提取非 线性形变	高相干点选取较难、成本高 应用推广存在一定的局限性 复杂形变环境易损失细节信息
QPS	Lanari 等, 2004, 2007; Perissin 和 Wang, 2012	滑坡断层监测	空间滤波保证了干涉图能获取更多 信息 能在非城区 PS 点不足条件下提取相 干信息	形变信息提取精度不够 空间滤波影响目标信息提取精度
SqueeSAR	Ferretti 等, 2011	滑坡制图、火山形变、 山区滑坡	解决了稀疏植被覆盖地区形变信息 提取难题 所有可利用干涉图均参与计算、数 据利用率高 无需考虑时空基线、同质滤波提高 了 DS 相干性	计算效率低 不适于大范围区域的精细监测 小样本同质集合中包含许多异质点
TCPIInSAR	Zhang 等, 2011	缓慢滑坡调查、高铁 沿线沉降	无需相位解缠、SAR 影像需求量 较少 最优化垂直基线获得最好相干性、 监测精度高	无与高分辨率 SAR 数据相匹配的 DEM 基于线性形变的模型假设、干涉图数 量少
POT	Michel 等, 1999a, b; Strozzi 等, 2002	地震、火山和冰川三 维形变场重建	适合监测快速、大量级形变等滑坡 无需相位解缠处理、不受高相干性 限制 只利用幅度信息就能获得方位、距 离向形变	形变监测精度受影像空间分辨率影响 对大气相位的变化和低相干性不敏感 监测精度不及 InSAR 技术、有冗余 计算

续表

技术方法	算法主要提出者	监测领域/范围	优点	缺点
GBInSAR	Tarchi 等, 1999, 2003	火山、水库大坝、桥梁、露天矿边坡、地表深层滑坡	较低的时间去相关、高时间分辨率 监测精度高、受外界影响小、采样周期短 非接触远程自动化实时监测、灵活有保障	尚无完善的大气相位改正模型 只适用于单体已知滑坡、大坝几平方千米 植被茂密区失相干严重、仅能观测视线向形变
MAI	Bechor 和 Zebker, 2006	地震、火山、冰川等相关的三维形变测量	无需进行地形相位消除、相位解缠 相比 POT 方位向解算精度和计算效率较高 可提取地表方位向形变作为 DInSAR 的补充 能抑制大气相位延迟、可用于三维形变场提取	MAI 干涉图易受电离层影响 干涉图中存在残余参考相位、地形相位 对于干涉相位噪声敏感、低相干区适用性低 测量精度受限(依赖)于相干性、精度不高
RSSI	Bamler 和 Eineder, 2005	地震、滑坡、矿山	可测量大梯度形变 相对 POT 对地表特征依赖性小	对像素信号的杂波比敏感性高 对地表形变敏感性弱、小梯度形变区监测精度低

### 3 InSAR 技术在滑坡中的关键应用

InSAR 技术方法的不断创新、计算机运算能力的持续提升以及不断积累的 SAR 卫星数据, 为滑坡应用研究提供了软、硬件的强有力支撑。实践表明, 植被稀疏、无积雪覆盖区 InSAR 非常适合滑坡早期识别、指示活动状态(速率、模式)、获取坡体形变三维信息、描述特定时间段形变趋势和诱因耦合分析(Strozzi 等, 2018)。本节归纳梳理了 InSAR 应用于滑坡地质灾害专题方面的进展并进行细致探讨。

#### 3.1 滑坡早期识别与探测

早期识别是滑坡灾害预警与防治能力提升的重要前提。已有研究表明, InSAR 技术在灾难性滑坡早期识别、灾害排查及辅助决策方面具有很大潜力。不同于实地安装传感器记录的详细高频数据, InSAR 能够在大区域范围内监测毫米级的地表形变, 追溯地表长期微小变形, 提供基于面状的滑坡形变特征及时间演化过程(Carlà 等, 2019; Zhang 等, 2020)。特别是对高位、集中分布滑坡灾害的排查中, 凭借其对活动性滑坡识别的突出优势, 使得滑坡调查工作更全面、高效。基于不同情境, 学者们开展了系统的识别方法与分析研究。其中, Di Martire 等(2016)提出一种滑坡集成探测方法 LaDIS (Landslide Detection Integrated System), 该方法通过实地现场调查与 PSInSAR 获取结果相互比较, 用于分析大区域缓慢、极慢移动坡体的不稳定性, 并在意大利西西里地区应用 COSMO-SkyMed 数据进行实践。为确保评估的独

立性, 在未共享 PSInSAR 监测情况下, 进行实地调查检验。结果表明, 通过 PSInSAR 确定的不稳定区域中, 49% 与现场调查符合。其余情况下, SAR 卫星高灵敏度能够识别出其他非常缓慢的坡体运动。Hu 等(2016)应用新的时间序列 CT (Coherent Target) 方法, 对 2007 年—2011 年华盛顿广阔森林地带季节性滑坡的时空变化进行探索, 使用两个重叠的 L 波段 ALOS-1 卫星轨道数据进行 InSAR 处理。结果表明, 所用方法可识别森林边缘未知的活动性滑坡, 并能跟踪其季节性运动。此外, Nakano 等(2016)在日本全境 InSAR 形变监测识别中发现, 除部分已知火山和地震引起形变外, 经调查发现其余识别出的形变地点与已知的大多滑坡区域吻合。

国内, 学者 Xia 等(2004)最早在三峡库区开始将 InSAR 技术应用于滑坡调查、监测、识别研究中, 自此开始长达数十年的技术探索、方法试验、活动特征识别、大形变测量及与地面监测手段联合等应用研究, 为国内将 InSAR 技术应用于滑坡灾害识别、探测提供了很多前瞻性、基础性研究成果(葛大庆, 2019)。近些年, 滑坡灾害不断频发, 使得基于 InSAR 的滑坡灾害应用研究在流域、库区和高原地带更加广泛。如在滑坡高发区甘肃甘南白龙江流域, 张毅(2018)基于 InSAR 技术进行了滑坡早期识别工作, 系统探索了 InSAR 在滑坡识别和评价方面的可行性和应用能力, 建立了基于 InSAR 技术的滑坡早期识别和评价方法体系, 并根据识别的滑坡点进行地貌制图、滑坡编目等工作。同时, 针对 PSInSAR 方法在山区应

用中受到植被覆盖等不利因素影响、滑坡探测识别可靠性较差的问题,张路等(2018)自主研发了相干散射体时序CSI (Coherent Scatterer InSAR)方法,成功识别出大渡河上游区域内持续变形的不稳定坡体,并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;Shi等(2019)在黄河上游李家峡和龙羊峡库区,利用ALOS PALSAR和Sentinel-1数据,应用时序DInSAR方法联合分布式散射体(DSs)和永久散射体(PSs)用于探测识别和圈定活动性滑坡,在超过222.5 km<sup>2</sup>范围内识别出100多处滑坡。此外,张亚迪等(2019)采用SBASInSAR方法,利用ALOS和ENVISAT数据集对西藏芒康地区潜在的滑坡灾害隐患进行识别,发现318国道沿线和金沙江河谷多处疑似隐患点,获得了滑坡形变的分布图和时间演化特征;刘国祥等(2019a)联合卫星SAR和地基SAR技术手段,在海螺沟冰川区域内开展时序监测分析。通过使用POT和Stacking-InSAR方法,利用11年间多景PALSAR影像,在海螺沟U型谷北坡探明多处不稳定滑坡体,首次系统揭示海螺沟冰川运动分布情况,监测数据及结果为冰冻圈及山地灾害研究提供了参考。

总结发现,滑坡灾害早期识别具有明显的区域地带特征,国内外已在诸多滑坡高发区利用InSAR对活动性滑坡进行识别,对其可行性、有效性、适用性和实际应用效能进行了很好的探索、验证,为类似滑坡活跃区进行早期识别及区域地质灾害调查提供了参考。然而,受限于侧视成像的特点及山区高海拔落差、密集植被、冰雪覆盖及复杂多变气候的影响,存在着相干点密度低、大气延迟严重,数据精度和可靠性难以保证等诸多现实性问题。具体梳理如下:首先,在山区SAR侧视成像所造成的畸变、滑坡区密集植被覆盖及大气效应的改正仍是当下进行识别所面临的现实瓶颈问题;其次,国内InSAR滑坡识别更多侧重于小区域范围,组织大规模区域性(20—30万km<sup>2</sup>左右)、规模化滑坡早期识别工作还不够充分和全面,仅在四川、贵州等区域开展了试点工作。而对于那些人迹罕至、观测条件苛刻的区域,运用InSAR技术进行活动性滑坡的识别是当下滑坡防治中的难点。同时,如何将InSAR技术方法推广到一定的广域范围,甚至全境陆域,进行大规模快速处理,面向工程化应用的排查识

别,切实为地质灾害防治调查提供支撑仍有待研究。德国、意大利、英国等已有利用InSAR、云计算、大数据等技术对全境地表进行形变监测的案例(Cigna等,2014),识别潜在灾害隐患点,并进行了应用效能评估与验证;最后,目前滑坡识别聚焦于利用SAR影像相位信息进行InSAR处理提取形变信息,而SAR数据是幅度与相位的结合体,利用SAR影像幅度信息自动识别和解译滑坡是另一条重要途径(李强和张景发,2019),如何将幅度信息解译与InSAR滑坡监测两者进行有效结合,是未来需要攻克的难题。

### 3.2 不同形变量级滑坡监测

InSAR的本质是相位测量,良好的相位干涉是InSAR技术有效探测地表坡体形变的前提。当滑坡形变较大时,相位测量容易出现混叠或失相干进而导致测量结果不可靠。同时,缓慢蠕变滑坡相比于常规、大变形、快速滑动滑坡而言具有很大的潜在风险。另外,不同InSAR方法具有一定的应用条件、特点及限制因素(朱建军等,2017)。因此,针对不同量级的滑坡形变需采用合适及改进的InSAR方法才能有效提取滑坡形变信息。

针对缓慢移动滑坡,Confuorto等(2017)通过相干像素技术—一时间子相干性、SBASInSAR以及与岩土工程分析相结合的方法研究了一次缓慢滑坡过程,论证了岩土工程与InSAR技术相结合的应用,并在工程实践中取得良好效果。另外,在植被覆盖茂密、湿度高、坡体陡峭及常规InSAR技术方法具有挑战性的三峡地区滑坡监测中,Sun等(2017)探索使用SBAS偏移跟踪方法(SBAS Offset Tracking)监测缓慢滑坡,为获得高密度的可靠性测量结果,通过最小化偏移对中时间和空间去相关,结果证明与相应GPS测量结果非常吻合。Bru等(2018)提出在区域尺度缓慢滑坡运动中使用SAR数据的流程,其中包括考虑场景特征选择适当数据集、可视性分析以及将A-DInSAR(Advanced DInSAR)获取形变信息与其他监测技术进行比较时所考虑的因素,分析表明A-DInSAR方法对于不同尺度低速滑坡精细监测非常有效且具有通用性。此外,Barla等(2017)应用GBInSAR对阿尔卑斯山脉西北部Comba Citrin滑坡进行监测,并将夏秋两季间隔63天监测获得影像应用Stacking进行处理,发现监测区域滑坡存在

毫米至厘米级移动, 结果表明 GBInSAR 对已知滑坡点监测更具有持续性、高频性。

关于较大形变可能造成的失相干等问题, Wang 等 (2014) 提出一种点目标偏移量分析 PTOT (Point-like Target Offset Tracking) 方法, 利用雷达影像中具有较强幅度信息的角反射器等点目标进行形变信息提取。结论表明 PTOT 方法对地震、滑坡等地质灾害区域的监测结果在测量精度和稳定性方面有明显提升。同时, Dai 等 (2016) 通过 Sentinel-1 TOPS 模式数据对四川绵阳大广包巨型滑坡进行监测, 针对 TOPS 雷达信号中引入的方位向相关的多普勒变化信号, 提出一种 TOPS 时间序列干涉测量处理方法, 发现将 TOPS 数据应用于 InSAR 时序分析有很大的潜力。此外, Luo 等 (2019) 提出一种距离分频干涉辅助相位解缠的方法, 并进行仿真和实际实验, 研究为较高精度地监测大梯度滑坡引起的地表运动研究取得积极的进展。有关大形变处理造成的传统 InSAR 方法失相干问题上, Li 等 (2020) 在西藏白格滑坡累计地表位移超过 40 m 情况下, 采用自适应 APOT (Adaptive POT) 方法减轻 Sentinel-1 方位向分辨率较低对形变监测结果的影响, 在互相关计算中, 用掩模代替常规窗口, 提取出每个图像对之间的偏移量, 在最小二乘准则估计下获得时间序列位移。

综上可知, 不同 InSAR 方法可以监测不同特征、类型滑坡形变过程。学者斋藤迪孝 (1968) 提出滑坡形变过程可分为初始、等 (匀) 速、加速形变 3 个阶段。不同滑坡阶段具有不同形变特征, 需采用不同 InSAR 方法对其滑坡时空演化规律进行有机结合、综合分析。另外, 相干性作为 InSAR 测量的前提, 需要确保重复轨道观测时相干, 包括卫星系统基线、噪声满足要求、保证时间基线相干。应用中需考虑 SAR 数据波长、周期、分辨率的有效组合, 并尽可能在技术上进行优化设计。同时, 需从成灾到致灾过程的变形强度和形式上设计 InSAR 数据处理技术及其组合。葛大庆 (2019a, 2019b) 根据 InSAR 技术方法及其应用条件、目标提出用于滑坡形变全过程监测技术体系如表 2。除根据滑坡体形变尺度特征选择不同 InSAR 方法之外, 监测中还需要选择合适的 SAR 数据以及借助人造角反射器 CR (Corner Reflector)、GPS 等地面观测手段。另外, 现有 InSAR 方法也只能解决超慢—中速滑坡 (10 mm/a—10 m/月), 加之 GBInSAR 可监测快速 (1 m/h) 滑坡。同时, 受限于卫星重访周期及滑坡加速失稳的短时效。所以在已知坡体监测中当移动速度过快时, 应有效结合其他可行方法如 GPS 观测站等。

表 2 滑坡形变“全过程”InSAR 监测技术方法体系

Table 2 Classification of InSAR monitoring techniques and methods for landslide deformation “whole process”

形变特征	一般缓慢形变	长期缓慢形变	季节性快速非均匀形变	滑坡整体大形变
InSAR 方法	DInSAR、MAI	MT InSAR	宽带 SAR 子带干涉	POT、RSSI
监测内容	整体活动范围和强度	坡体上相干目标连续监测	非均匀形变精细监测	大形变调查与监测
应用效果	小范围定性分析、滑移方向可测、状态识别	定性、定量, 大范围应用, 处理要求高	单坡体定性、定量监测分析、需借助地面观测方法	单体滑坡监测 小区域、定性为主
SAR 数据	长波长、短间隔、高分辨率	现场决定选择数据及处理方法	高分辨、短周期、高相干性	S、L 波段影像
其他辅助方法	地基 SAR、GPS	GPS、地基 SAR、激光扫描	地基 SAR、激光扫描、GPS、机载 LiDAR	CR、GPS、无人机航测、光学影像

### 3.3 滑坡活动模式与三维信息获取

获取滑坡时空演化模式及三维形变信息对于滑坡工程治理、滑坡诱发机理机制掌握等有重要科学实践意义, 亦是滑坡预测成功与否的关键内容。对此, Calò 等 (2014) 提出一种基于 DInSAR 与传统地质岩土信息有效结合的创新性建模方法,

并采用 SBASInSAR 方法从多源时序 SAR 数据中, 对滑坡长期形变与运动演化进行了表征与深入了解, 并将实例扩展到不同地质和岩土工程条件, 在理解由活动滑坡引起的地面形变方面提供了积极进展。三峡地区滑坡形变活动模式研究中, Liu 等 (2016)、敖萌等 (2017) 相继提出了一种考虑

SRTM 偏差的自适应时序 InSAR 方法和一种改进的基于相位相干性的非线性人工角反射器 InSAR 解算算法, 两者皆详细有效揭示了滑坡形变模式特征, 并且后者有效地避免了相位解缠误差。同时, 张毅 (2018) 基于时序 InSAR 方法获得的地表变形特征研究典型特大破碎岩石滑坡时空变形模式, 研究发现特大型破碎岩石滑坡形变在时间上与外界诱因呈现高度的相关性。在黄土滑坡失稳模式研究中, 针对单一雷达视线向形变的局限性, 赵超英等 (2019) 采用多维小基线集 MSBAS (Multi-dimensional SBAS) 时序 InSAR 分析方法, 利用多源、多轨道、多时相 SAR 数据, 综合多源 InSAR 二维形变特征、光学遥感影像、地形等数据, 发现受地下水上升及自身重力作用, 黄土滑坡失稳模式为渐进后退式失稳。有关 2018 年金沙江滑坡时空位移模式研究中, Jia 等 (2020) 提出了一种针对非显著区域的同质自适应非相干斑追踪 AISOT-HS (Adaptive Incoherence Speckle Offset Tracking Based on Homogeneous Samples) 方法, 降低了传统 POT 方法在估计窗口设计方面对经验的高度依赖, 在同等精度需求下有效提高了整体效率与结果置信度, 并利用 GF-3 和 ALOS PALSAR-2 数据分析推断该滑坡类型为推覆式。

总结可知, 滑坡形变模式分析研究需要综合考虑研究区地质构造、水文、诱因等相关背景知识, 这也促进了 InSAR 地表形变与其他学科的交叉。同时, 未来如何将滑坡体岩土工程实验分析与 InSAR 测量获得历史形变数据进行深度融合, 辅助于滑坡体结构破坏和失稳模式分析, 进而在 InSAR 连续动态监测数据支撑下为缓慢滑坡失稳预测预警服务还需不断探究。

由于 InSAR 只能监测地表形变在雷达视线方向 LOS (Line of Sight) 上的一维投影, 而滑坡是地表三维形变过程, 所以仅利用单一 InSAR 方法形变观测值很难反映滑坡真实形变模式。通过融合多颗 SAR 卫星平台获取的多轨道数据及不同 InSAR 方法的组合获取不同角度方向的形变信息, 可以将 InSAR 一维形变拓展至三维 (Hu 等, 2014)。因此, 有学者研究对同一区域采用多轨星载 SAR 数据+InSAR 技术、多轨 InSAR 观测方法融合等方式, 获取区域滑坡三维形变信息。具体有: Singleton 等 (2014) 通过亚像素偏移量方法使用

升、降轨 (分别提供变形两个分量: 视线向和方位向) 数据结合来推导滑坡 3D 位移的可行性, 进而推断滑坡的破坏机制; Li 等 (2019) 提出一种新的时序点状目标偏移跟踪 TS-PTOT (Time Series PTOT) 方法, 结合长时间和短空间基线, 从 SAR 图像对中提取点状目标的时序信息, 通过结合来自两个 SAR 数据集的 TS-PTOT 测量的二维位移, 估计滑坡三维位移。同时, 根据对稳定点时序位移标准偏差的评估分析发现, TS-PTOT 方法相对于 POT 方法将精度提高了约 25%; Shi 等 (2018) 通过传统 InSAR 与 POT 融合的方式分别获取视线向和方位向形变, 而后将两者进行集成, 获取地表滑坡形变三维信息; 廖明生等 (2017) 针对降轨 TerraSAR-X 条带和聚束模式两种数据集在观测视角的差异, 利用其所造成距离向之间结果的偏差, 忽略不同视角两种数据集日期相似内的形变, 使用 POT 反演了树坪滑坡三维形变, 之后利用三次样条插值将提取的距离向和方位向形变变量进行处理, 最终得到时间序列三维形变。对比发现, POT 方法在地表三维形变信息获取方面具有很好的实效性 (Jia 等, 2020), Chen 等 (2020) 利用 POT 监测获得的地表位移信息与地面设立的密集 GPS 观测站相比较检验, 发现其水平和垂直方向的位移差都在亚厘米级别以内。

当前 InSAR 滑坡三维形变研究, 更多是基于外部数据 (GPS、水准)、地表平行移动假设 (忽略南北向位移分量)、多源升、降轨 SAR 数据及多种 InSAR 方法联合应用的方式, 做到取长补短, 在信息量和精度方面达到平衡 (表 3)。但就目前的技术水平而言, 基于上述方法的三维形变场恢复和重建会导致不同程度的精度和分辨率的损失。升、降轨 SAR 数据与不同 InSAR 方法的结合, 可为滑坡三维形变信息获得提供现有条件下的解决方案。所以, 目前如何顾及滑坡灾害时空演化过程复杂性条件下, 提高研究多源 SAR 数据、多轨 InSAR 技术应用于不同活动模式的滑坡来提高获取三维形变信息的稳健性与准确性仍有待探究。除此之外, 如何将 SAR 与多源异质数据如: LiDAR、三维激光扫描仪等深度融合, 实现数据之间的优势互补。设计合理可行的方案, 实现滑坡三维信息、活动模式获取仍有待进一步深入研究探讨。

表3 常用 InSAR 三维形变监测方法  
Table 3 The summarize of general methods of InSAR 3D deformation monitoring

具体策略、方法	优点	缺点	典型应用案例
多轨 DInSAR	垂直、东西向解算精度高 分辨率无损失	南北向提取精度低	刘国祥 等, 2019b
升降轨 DInSAR、POT	垂直、东西精度高	南北向精度较低 计算耗时	Shi 等, 2018
升降轨 DInSAR、MAI	垂直、东西精度高	南北向精度一般、对相干性依赖性高 容易失相干、整体干涉精度有损失	Wang 等, 2015
升降轨 POT	只需升、降轨数据 不受时空失相干影响	垂直、东西、南北向解算精度较低	Singleton 等, 2014; 廖明生 等, 2017; Chen 等, 2020
DInSAR、GPS 集成	各向解算精度较高 只需要单轨数据	强烈依赖于地面观测站数量及分布	Hu 等, 2014
地表先验信息辅助	只需升轨或降轨数据 水平向形变解算精度高	需要高精度 DEM 地表垂直向形变明显时无效	Li 等, 2014

### 3.4 滑坡诱因耦合分析

InSAR 获取的形变信息为诱因分析奠定了基础, 形变与诱因耦合分析对理解滑坡形变趋势及早期预警具有决定性作用, 也是破解其链生演化难题的入口。滑坡不稳定性可以归因于区域尺度上地质、自然及人为等因素 (图 1)。降雨是影响坡体稳定性最重要的外在因素, 探索与长时序滑坡形变的相关性, 对掌握滑坡触发机制、早期防治至关重要 (Tong 和 Schmidt, 2016; Confuorto 等, 2017)。强降雨会诱发滑坡灾害, Hilley 等 (2004) 发现“厄尔尼诺”现象会使滑坡移动速率增加, 并且降雨高峰与最大滑坡位移滞后时间约为 1—2 个月 (Zhao 等, 2012)。此外, 蒋亚楠 (2018) 用数据同化方法, 研究了库水联合降雨作用下滑坡变形响应机制, 利用岩土体位移反分析思想, 实现了 InSAR 时序变形观测数据耦合岩土数值分析模型的数据同化研究, 为岩土体变形观测和数值模拟耦合分析提供了重要参考。

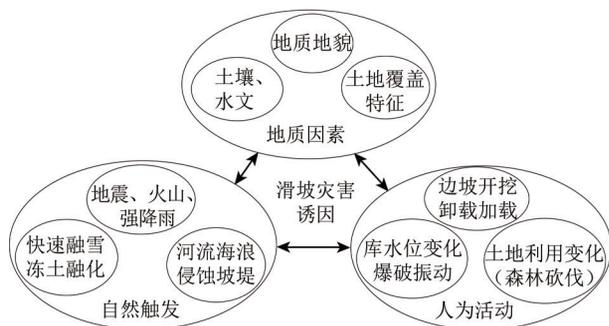


图1 滑坡诱发因素

Fig.1 The landslide-inducing factors

地震是滑坡的另一重要诱因, 强震在山区所诱发滑坡、崩塌等次生灾害往往比地震本身更严重。程海琴等 (2014) 发现震后滑坡受发震断层上盘逆冲运动特性滞后效应较为显著。除降雨、地震两大主要诱因外, 还有水库蓄水变化、人工堆填加载、冰川消融加速、地下资源开采、持续农业灌溉及大型基础设施工程建设也会导致滑坡发生 (Strozzi 等, 2017, 2018; Carlà 等, 2019; 史绪国 等, 2019; Shi 等, 2019; Chen 等, 2020)。如刘国祥等 (2019a) 通过对多年 PALSAR 影像应用 POT 方法分析表明, 在海拔 2900—3900 m 冰舌区, 随着季节更替, 冰川运动速度呈周期性波动。统计分析表明, 此类滑坡运动与冰川消融具有强相关性, 滑移速度在每年夏季达到峰值; 最后, 滑坡变形演化特征与坡体所处地质环境条件密切相关。回顾可知, 目前 InSAR 滑坡诱因研究, 更多是考虑外界诱因与监测形变之间的响应反馈以及少许引入新技术的创新, 少有结合地质条件对形变信息进行深层次的剖析。此外, 如何利用 SAR 幅度信息反演滑坡地质物理参数, 以便更好地与地质灾害机理研究深层次融合、协同及系统集成和方法研究需进一步提升, 以便对滑坡灾变全过程进行感知探测、模拟仿真, 进而为早期预警服务。

总结发现, 通过 InSAR 滑坡监测应用分析发现, InSAR 技术为滑坡防治从“灾后分析”转向“灾前预判、识别”提供了重要支撑。同时, 滑坡研究中以 InSAR 为主其他遥感技术为辅的多元/源遥感融合监测技术正成为定性和定量灾害应用研

究的关键工具。具体可以归纳为：一是数据的融合和互补，其中包括各类SAR卫星数据、SAR数据与常规光学/多光谱遥感数据的融合（Raucoules等，2013）；二是不同类别技术之间的融合，包括各类InSAR方法的融合以及InSAR与传统地貌模型（Cascini等，2010）、地质勘查、岩土工程分析等的结合，该类融合有利于不同InSAR方法监测数据的相互验证与判断，能有效提高对InSAR监测地表形变的可靠性和准确性。

同时，多源遥感对地观测技术在滑坡灾害中的应用是目前国际遥感和地质灾害交叉研究的热点和难点，综合运用各类高精度对地观测技术开展活动性滑坡识别、排查已被业界所认可，如刘星洪等（2018）研究以InSAR变形为主，辅助光学遥感、地貌和地质条件特征，进行活动性滑坡的快速排查；Li等（2020）将POT方法和光学遥感观测相结合应用PALSAR-2、Sentinel-1及GF-2数据，反演了白格滑坡三维地表位移，揭示了滑坡体内部的非均匀空间格局；Zhang等（2020）在甘肃省永靖县，综合利用InSAR技术、数学统计模型和无人机测绘等，进行区域尺度地表时空变形监测分析，结合历史滑坡发育特征，首次提出在区域尺度上预测潜在滑坡位置、范围、面积和体积的新方法，并预测了黑方台地区潜在滑坡空间分布和规模，并结合长期历史调查数据进行了验证。此外，不同InSAR方法和数据融合，构成了完善的InSAR滑坡监测体系。综上，尽管InSAR滑坡专题方面研究已取得显著进展，但是针对滑坡灾害全过程InSAR监测方法研究不足、应用InSAR技术量化进行滑坡风险与损失评估深度不够、应用InSAR进行滑坡自动化、智能化监测以及应用InSAR对滑坡进行精细化管理等问题仍亟待解决。未来如何利用多元/源遥感技术实现滑坡全过程进行精细制图、监测、识别、智能预警仍值得研究。

#### 4 局限性与挑战

总结上述已有研究发现，尽管InSAR滑坡应用已取得较大进步，但受制于雷达遥感卫星本身的局限性，以及滑坡地形环境复杂性，监测中易受地形、地表覆盖密集植被及冰雪等因素影响，存在以下局限性：

(1) 几何畸变。SAR侧视成像的固有特点决

定了InSAR测量的敏感度，而入射参数与地形参数的关系决定其能否有效成像。地形起伏较大山区，由于侧视成像导致SAR影像产生叠掩、阴影、透视收缩等畸变（图2），严重影响了SAR探测能力和应用范围，造成无效的观测盲区（Wasowski和Bovenga，2014）。因此，实际应用中为避免叠掩、阴影区域影响监测结果，需预先根据DEM及SAR几何参数进行SAR适用性、可视性量化分析（李振洪等，2019），可借助机器学习算法高精度提取叠掩、阴影区，亦可优选轨道和入射角，使得顶底倒置和阴影区面积最小。此外，可利用升降轨数据分别处理获取滑坡监测信息，在一定程度上补偿单一成像几何不足问题。

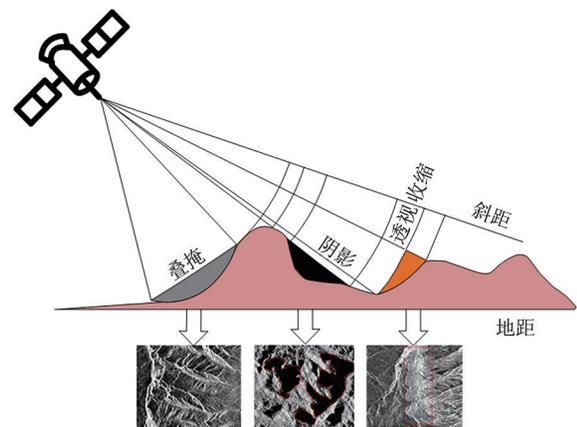


图2 地形效应在SAR影像中的几何畸变

Fig.2 Topographic distortions in SAR image

(2) 密集植被覆盖。滑坡区域环境因素决定着SAR卫星观测条件的优劣，滑坡区多分布密集植被，并且高海拔山区常年覆盖有冰雪，季节性融雪和密集植被会导致低相干、失相干现象，这直接影响了InSAR形变反演的效果和精度。实际应用中为获得更多区域形变信息，可考虑选择长波长、短间隔、高空间分辨率SAR数据集；InSAR方法中，尽可能选择联合分布式散射体目标，能增加观测数、增强信噪比的SBASInSAR、SqueeSAR等方法。另外，可采用大带宽SAR子带干涉测量处理技术提取形变信息，可有效实现长时间间隔下滑坡大尺度变形测量，提高InSAR在植被覆盖茂密地区的适用性。此外，还可借助CR、GPS等工具进行联合监测。

(3) 大气效应。山区或高海拔地区SAR影像处理易受大气扰动、体散射失相干等因素制约，特别是多云雨环境高山峡谷区水汽含量时空变化

会影响干涉图相干性,因此大气效应分离和去除是目前高精度干涉测量和应用中的关键问题和热点,也是时序InSAR应用于滑坡监测的主要瓶颈(云焯等,2020)。针对此问题,利用合适模型削弱其影响是非常有效的解决措施,如ERA-1、MERRA-2、通用卫星雷达大气改正系统GACOS(Generic Atmospheric Correlation Online Service for InSAR)(Yu等,2018)。另外,实际应用中,在数据量能满足时间精度的要求下,应当优先考虑利用专家经验目视判读干涉图,剔除大气影响较重干涉图。

(4) 三维形变监测。InSAR监测的地表形变实际仅为一维视线方向形变,对方向向探测能力几乎为零,而非地表在垂直、东西和南北方向真实三维形变(朱建军等,2019),这一缺陷严重影响了InSAR技术在实际滑坡地质灾害风险评估和形变机理机制研究中的应用。尽管有基于幅度影像匹配的POT及表3等总结的方法可获取滑坡三维信息,但存在精度有损、方法复杂、基于先验假设的不足(廖明生等,2017)。因此,未来还需在数据源有效的情况下,对于如何实现准确、高效的三维形变干涉测量进行探索。

(5) InSAR监测结果检验。目前大多InSAR测量结果为保证监测的可靠性,基本上都依赖于实地测量数据如水准、GPS等比较分析,或者方法与数据的相互交叉验证来检核其精度和可靠性。最科学的方法是在研究区布设人工角反射器,之后利用地面测量手段对其进行精密测量,以此为标准对InSAR结果进行精度评定(Ferretti等,2007; Singleton等,2014)。但是,布设人工角反射器只能满足小区域范围和已知单体滑坡监测,同时需要耗费大量人力、物力而难以大范围内推广普及。然而,滑坡灾害防治中,往往那些人迹罕至、高海拔、地质条件复杂区是滑坡的重点防治区。因此,亟需构建完善的InSAR误差源分析和精度评定数学模型理论,使其InSAR能够成为一种更为广泛可靠的高精度测量技术提供强有力的理论支撑。

(6) 滑坡系统的复杂性。除InSAR系统本身局限性外,滑坡作为一个高度复杂的地质力学过程,监测中也受其本身因素影响。滑坡过程通常具有诱发因素众多、形成机制复杂、破坏力强、形变非线性、位移演化模式复杂、时变性和不确

定性等特点(朱庆等,2019),难以对全过程建立准确模型模拟,给准确分析、监测和预测带来了困难(邓建辉等,2019)。因此,从灾害自身角度出发还需进一步理清重大滑坡孕灾环境与成灾机制,这需要多学科综合交叉、融合,从成因机制入手,破解其链生演化难题。最后,InSAR滑坡监测所获取的是坡体“内因”本身及“外因”诱发下出现的“表象”,应用中监测的“表象”和坡体“内外因”相辅相成的耦合分析是深层次认识滑坡的重要途径。所以,如何利用其观测结果对相应的坡体动力学现象进行反演和机制解释,为灾害预测和预防服务,在当今的InSAR滑坡应用领域尤为重要。

## 5 结 语

伴随雷达技术的发展,InSAR基本理论与主流数据处理技术已趋于成熟,InSAR已从技术主导型发展为以应用为主。尤其是当前InSAR在单体滑坡动态监测、区域滑坡早期识别探测等方面一系列的重要应用研究成果。这一方面得益于InSAR理论方法的不断创新,另一方面源于SAR卫星数据的不断积累。同时,针对InSAR技术滑坡灾害应用研究的现有形势、面临挑战及未来发展趋势,还需不断加强以下几个方面的改进和探讨:

(1) InSAR数据处理技术。InSAR技术的各种算法、模型、处理软硬件都已基本趋于成熟。但在普及应用中各平台(GAMMA、DORIS、ROI-PAC等)之间数据处理时,前提假设、模型参数、解算策略、效率和自动化程度等各有不同,进而导致通用性差。InSAR数据处理仍是当下的热难点,如快速高效实现解缠、大气效应精细改正,影像处理角度削弱地形效应影响,不同类型波段及升、降轨数据融合处理,不同数据源精度匹配、SAR与多源异质数据融合处理、InSAR处理精度评定方法探索、普适性SAR数据处理软件开发等。同时,借助云计算、网络技术进行广域范围SAR大数据处理,提升大区域范围地质灾害普查中的推广应用,仍需进一步探究。相信未来上述问题的解决,将使InSAR技术的稳定性和鲁棒性得到长足进步。

(2) InSAR与其他新型对地观测技术融合滑坡应用。无人机遥感(机载SAR、LiDAR、航测)、地震台网观测、无人机半航空瞬变电磁探测等技

术发展飞速。各类平台之间如何优势互补进行衔接,如利用无人机在卫星两次重访周期期间进行重点滑坡区域监测巡查,根据地震台网监测结合基础地理数据及滑坡敏感性分析评价模型对可能诱发滑坡的区域进行预判、圈定,后期利用 InSAR 进行重点监测等。另外,InSAR 技术滑坡应用研究涉及工程地质、灾害遥感、GIS、水文气象、地球物理等多个以地学为核心的相关学科。未来如何利用多学科的优势在滑坡应用中进行互补增强、深度融合将是持续钻研的方向。

(3) InSAR 与深度学习结合滑坡研究。深度学习技术的出现为遥感影像变化检测技术提供了新的理论支撑,但是目前基于深度学习、变化检测技术与 InSAR 监测相结合的研究处于初步探索与实验阶段。未来应在现实需求目标引领驱动下,推进机器学习、专家系统与遥感信息识别 AI 方法研究,建立灾害专家样本库,在光学影像变化检测、InSAR 自动化筛选关键点剔除非灾害因素影响。另外,也可借助深度学习对 SAR 形变数据进行灾害信息的深度挖掘及早期预警。

(4) InSAR 滑坡灾害应用(规范标准)体系构建。构建规范、高效的行业技术规范标准和指南是推进 InSAR 滑坡应用工程化、常态化、业务化的前提,如制定《地质灾害 InSAR 监测技术规程》类似行业规程等。而且技术积累与专业队伍建设也是必不可少的条件。相信未来随着 InSAR 滑坡监测稳定性不断提升,将形成稳定的行业技术体系与规模化应用能力。

综上所述,从滑坡监测类型、精度等方面而言,InSAR 滑坡监测已有较大进步,但是其中也存在着不足与挑战。未来随着各种波段、轨道、入射角、重访周期 SAR 数据变得更加便捷,高质量 SAR 数据的开放与应用,将进一步为滑坡早期识别预警、形变信息获取、机理机制挖掘提供更大便利。研究也将为“一带一路”、“中巴经济走廊”、“川藏铁路”等国家重大战略工程沿线和灾害易发区滑坡灾害的综合防治提供强有力支撑。

## 参考文献(References)

Ao M, Zhang Q, Zhao C Y and Liu G Q. 2017. An improved CR-InSAR technology used for deformation monitoring in Jiayu Landslide, Sichuan. *Geomatics and Information Science of Wuhan Uni-*

*versity*, 42(3): 377-383 (敖萌, 张勤, 赵超英, 刘广全. 2017. 改进的 CR-InSAR 技术用于四川甲居滑坡形变监测. *武汉大学学报信息科学版*, 42(3): 377-383) [DOI: 10.13203/j.whugis20140797]

Bamler R and Eineder M. 2005. Accuracy of differential shift estimation by correlation and split-bandwidth interferometry for wide-band and delta-k SAR systems. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2(2): 151-155 [DOI: 10.1109/LGRS.2004.84.3203]

Barla M, Antolini F, Bertolo D, Thuegaz P, D' Aria D and Amoroso G. 2017. Remote monitoring of the Comba Citrin landslide using discontinuous GBInSAR campaigns. *Engineering Geology*, 222: 111-123 [DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.03.019]

Bechor N B D and Zebker H A. 2006. Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair. *Geophysical Research Letters*, 33(16): L16311 [DOI: 10.1029/2006GL026883]

Berardino P, Fornaro G, Lanari R and Sansosti E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2375-2383 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792]

Bru G, Escayo J, Fernández J, Mallorqui J J, Iglesias R, Sansosti E, Abajo T and Morales A. 2018. Suitability assessment of X-band satellite SAR data for geotechnical monitoring of site scale slow moving landslides. *Remote Sensing*, 10(6): 936 [DOI: 10.3390/rs10060936]

Calò F, Ardzzone F, Castaldo R, Lollino P, Tizzani P, Guzzetti F, Lanari R, Angeli M G, Pontoni F and Manunta M. 2014. Enhanced landslide investigations through advanced DInSAR techniques: the Ivancich case study, Assisi, Italy. *Remote Sensing of Environment*, 142: 69-82 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.11.003]

Carla T, Intriери E, Raspini F, Bardi F, Farina P, Ferretti A, Colombo D, Novali F and Casagli N. 2019. Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR. *Scientific Reports*, 9(1): 14137 [DOI: 10.1038/s41598-019-50792-y]

Cascini L, Fornaro G and Peduto D. 2010. Advanced low- and full-resolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales. *Engineering Geology*, 112(1/4): 29-42 [DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.01.003]

Chen B Q, Li Z H, Yu C, Fairbairn D, Kang J R, Hu J S and Liang L. 2020. Three-dimensional time-varying large surface displacements in coal exploiting areas revealed through integration of SAR pixel offset measurements and mining subsidence model. *Remote Sensing of Environment*, 240: 111663 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111663]

Cheng H Q, Chen Q, Liu G X, Yang Y H and Liu L Y. 2014. Post-earthquake landslides distribution along Longmenshan Major Fault during rainy season with Short-baseline InSAR. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 43(9): 931-938 (程海琴, 陈强, 刘国祥, 杨莹辉, 刘丽瑶. 2014. 短基线 InSAR 探测龙门山主断裂带两侧震后雨期的滑坡空间分布特征. *测绘学报*, 43(9): 931-938) [DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0161]

Cigna F, Bateson L B, Jordan C J and Dashwood C. 2014. Simulating

- SAR geometric distortions and predicting Persistent Scatterer densities for ERS-1/2 and ENVISAT C-band SAR and InSAR applications: nationwide feasibility assessment to monitor the land-mass of Great Britain with SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 152: 441-466 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.06.025]
- Confuorto P, Di Martire D, Centolanza G, Iglesias R, Mallorqui J J, Novellino A, Plank S, Ramondini M, Thuro K and Calcaterra D. 2017. Post-failure evolution analysis of a rainfall-triggered landslide by multi-temporal interferometry SAR approaches integrated with geotechnical analysis. *Remote Sensing of Environment*, 188: 51-72 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.11.002]
- Dai K R, Li Z H, Tomás R, Liu G X, Yu B, Wang X W, Cheng H Q, Chen J J and Stockamp J. 2016. Monitoring activity at the Dagangbao mega-landslide (China) using Sentinel-1 TOPS time series interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 186: 501-513 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.09.009]
- Deng J H, Dai F C, Wen B P and Yao X. 2019. Investigation on the catastrophic mechanism and risk control measures of major landslides in Tibetan Plateau. *Advanced Engineering Sciences*, 51(5): 1-8 (邓建辉, 戴福初, 文宝萍, 姚鑫. 2019. 青藏高原重大滑坡动力灾变与风险防控关键技术研究. *工程科学与技术*, 51(5): 1-8) [DOI: 10.15961/j.jsuese.201900719]
- Di Martire D, Tessitore S, Brancato D, Ciminelli M G, Costabile S, Costantini M, Graziano G V, Minati F, Ramondini M and Calcaterra D. 2016. Landslide detection integrated system (LaDIS) based on in-situ and satellite SAR interferometry measurements. *Catena*, 137: 406-421 [DOI: 10.1016/j.catena.2015.10.002]
- Fan Y D, Wu W, Wang W, Liu M and Wen Q. 2016. Research progress of disaster remote sensing in China. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 1170-1184 (范一大, 吴玮, 王薇, 刘明, 温奇. 2016. 中国灾害遥感研究进展. *遥感学报*, 20(5): 1170-1184) [DOI: 10.11834/jrs.20166171]
- Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, Prati C, Rocca F and Rucci A. 2011. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9): 3460-3470 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2124465]
- Ferretti A, Prati C and Rocca F. 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5): 2202-2212 [DOI: 10.1109/36.868878]
- Ferretti A, Prati C and Rocca F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20 [DOI: 10.1109/36.898661]
- Ferretti A, Savio G, Barzaghi R, Borghi A, Musazzi S, Novali F, Prati C and Rocca F. 2007. Submillimeter accuracy of InSAR time series: experimental validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(5): 1142-1153 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.894440]
- Fruneau B, Achache J and Delacourt C. 1996. Observation and modeling of the Saint-Étienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics*, 265(3/4): 181-190 [DOI: 10.1016/S0040-1951(96)00047-9]
- Gabriel A K, Goldstein R M and Zebker H A. 1989. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B7): 9183-9191 [DOI: 10.1029/JB094iB07p09183]
- Ge D Q. 2019. Radar interferometry technology and application of geological hazard identification[R/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/bmogReBOgAwBzn8FnIW9eA> (葛大庆. 2019a. 雷达干涉测量技术与地质灾害隐患识别应用[R/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/bmogReBOgAwBzn8FnIW9eA>)
- Ge D Q, Dai K R, Guo Z C and Li Z H. 2019. Early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies: thoughts and recommendations. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7): 949-956 (葛大庆, 戴可人, 郭兆成, 李振洪. 2019b. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议. *武汉大学学报·信息科学版*, 44(7): 949-956) [DOI: 10.13203/j.whugis20190094]
- Hilley G E, Bürgmann R, Ferretti A, Novali F and Rocca F. 2004. Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis. *Science*, 304(5679): 1952-1955 [DOI: 10.1126/science.1098821]
- Hooper A, Segall P and Zebker H. 2007. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7): B07407 [DOI: 10.1029/2006JB004763]
- Hu J, Li Z W, Ding X L, Zhu J J, Zhang L and Sun Q. 2014. Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: a review. *Earth-Science Reviews*, 133: 1-17 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.02.005]
- Hu X, Wang T, Pierson T C, Lu Z, Kim J and Cecere T H. 2016. Detecting seasonal landslide movement within the Cascade landslide complex (Washington) using time-series SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 187: 49-61 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.10.006]
- Jia H Y, Wang Y J, Ge D Q, Deng Y K and Wang R. 2020. Improved offset tracking for predisaster deformation monitoring of the 2018 Jinsha River landslide (Tibet, China). *Remote Sensing of Environment*, 247: 111899 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111899]
- Jiang Y N. 2018. SAR deformation measurement, interpretation and data assimilation in geological disaster monitoring. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 47(10): 1425 (蒋亚楠. 2018. 地质灾害监测中的 SAR 变形观测、解译与数据同化研究. *测绘学报*, 47(10): 1425) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170565]
- Lanari R, Casu F, Manzo M, Zeni G, Berardino P, Manunta M and Pepe A. 2007. An overview of the small baseline subset algorithm: a DInSAR technique for surface deformation analysis//Deformation and Gravity Change: Indicators of Isostasy, Tectonics, Volcanism, and Climate Change. Basel: Birkhäuser: 637-661 [DOI: 10.1007/978-3-7643-8417-3\_2]
- Lanari R, Mora O, Manunta M, Mallorqui J J, Berardino P and Sansosti E. 2004. A small-baseline approach for investigating deforma-

- tions on full-resolution differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(7): 1377-1386 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.828196]
- Li J, Li Z W, Ding X L, Wang Q J, Zhu J J and Wang C C. 2014. Investigating mountain glacier motion with the method of SAR intensity-tracking: removal of topographic effects and analysis of the dynamic patterns. *Earth-Science Reviews*, 138: 179-195 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.08.016]
- Li M H, Zhang L, Ding C, Li W L, Luo H, Liao M S and Xu Q. 2020. Retrieval of historical surface displacements of the Baige landslide from time-series SAR observations for retrospective analysis of the collapse event. *Remote Sensing of Environment*, 240: 111695 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111695]
- Li M H, Zhang L, Shi X G, Liao M S and Yang M S. 2019. Monitoring active motion of the Guobu landslide near the Laxiwa Hydropower Station in China by time-series point-like targets offset tracking. *Remote Sensing of Environment*, 221: 80-93 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.006]
- Li Q and Zhang J F. 2019. Investigation on earthquake-induced landslide in Jiuzhaigou using fully polarimetric GF-3 SAR images. *Journal of Remote Sensing*, 23(5): 883-891 (李强, 张景发. 2019. 高分三号卫星全极化 SAR 影像九寨沟地震滑坡普查. *遥感学报*, 23(5): 883-891) [DOI: 10.11834/jrs.20197390]
- Li Z H, Song C, Yu C, Xiao R Y, Chen L F, Luo H, Dai K R, Ge D Q, Ding Y, Zhang Y X and Zhang Q. 2019. Application of satellite radar remote sensing to landslide detection and monitoring: challenges and solutions. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7): 967-979 (李振洪, 宋闯, 余琛, 肖儒雅, 陈立福, 罗慧, 戴可人, 葛大庆, 丁一, 张宇星, 张勤. 2019. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用: 挑战与对策. *武汉大学学报·信息科学版*, 44(7): 967-979) [DOI: 10.13203/j.whugis20190098]
- Liao M S, Zhang L, Shi X G, Jiang Y N, Dong J and Liu Y Z. 2017. Method and practice of landslide deformation monitoring by radar remote sensing. Beijing: Science Press (廖明生, 张路, 史绪国, 蒋亚楠, 董洁, 刘宇舟. 2017. 滑坡变形雷达遥感监测方法与实践. 北京: 科学出版社)
- Lin H, Ma P F and Wang W X. 2017. Urban infrastructure health monitoring with spaceborne multi-temporal synthetic aperture radar interferometry. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1421-1433 (林珏, 马培峰, 王伟玺. 2017. 监测城市基础设施健康的星载 MT-InSAR 方法介绍. *测绘学报*, 46(10): 1421-1433) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170339]
- Liu G, Guo H D, Perski Z, Fan J H, Bai S B, Yan S Y and Song R. 2016. Monitoring the slope movement of the Shuping landslide in the Three Gorges Reservoir of China, using X-band time series SAR interferometry. *Advances in Space Research*, 57(12): 2487-2495 [DOI: 10.1016/j.asr.2016.03.043]
- Liu G X, Chen Q, Luo X J and Cai G L. 2019b. The Principle and Application of InSAR. Beijing: Science Press (刘国祥, 陈强, 罗小军, 蔡国林. 2019b. InSAR 原理与应用. 北京: 科学出版社)
- Liu G X, Zhang B, Zhang R, Cai J L, Fu Y, Liu Q, Yu B and Li Z L. 2019a. Monitoring dynamics of Hailuoguo Glacier and the secondary landslide disasters based on combination of satellite SAR and Ground-Based SAR. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7): 980-995 (刘国祥, 张波, 张瑞, 蔡嘉伦, 符茵, 刘巧, 于冰, 李志林. 2019a. 联合卫星 SAR 和地基 SAR 的海螺沟冰川动态变化及次生滑坡灾害监测. *武汉大学学报·信息科学版*, 44(7): 980-995) [DOI: 10.13203/j.whugis20190077]
- Liu X H, Yao X, Zhou Z K, Li L J and Yao J M. 2018. Study of the technique for Landslide rapid recognition by InSAR. *Journal of Geomechanics*, 24(2): 229-237 (刘星洪, 姚鑫, 周振凯, 李凌婧, 姚佳明. 2018. 滑坡灾害 InSAR 应急排查技术方法研究. *地质力学学报*, 24(2): 229-237) [DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2018.24.02.024]
- Luo H B, Li Z H, Chen J J, Pearson C, Wang M M, Lv W C and Ding H Y. 2019. Integration of Range Split Spectrum Interferometry and conventional InSAR to monitor large gradient surface displacements. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74: 130-137 [DOI: 10.1016/j.jag.2018.09.004]
- Massonnet D and Rabaute T. 1993. Radar interferometry: limits and potential. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31(2): 455-464 [DOI: 10.1109/36.214922]
- Massonnet D, Rossi M, Carmona C, Adragna F, Peltzer G, Feigl K and Rabaute T. 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364(6433): 138-142 [DOI: 10.1038/364138a0]
- Michel R, Avouac J P and Taboury J. 1999b. Measuring ground displacements from SAR amplitude images: application to the Landers earthquake. *Geophysical Research Letters*, 26(7): 875-878 [DOI: 10.1029/1999GL900138]
- Michel R, Avouac J P and Taboury J. 1999a. Measuring near field coseismic displacements from SAR images: application to the Landers earthquake. *Geophysical Research Letters*, 26(19): 3017-3020 [DOI: 10.1029/1999GL900524]
- Michoud C, Baumann V, Lauknes T R, Penna I, Derron M H and Jaboyedoff M. 2016. Large slope deformations detection and monitoring along shores of the Potrerillos dam reservoir, Argentina, based on a small-baseline InSAR approach. *Landslides*, 13(3): 451-465 [DOI: 10.1007/s10346-015-0583-4]
- Nakano T, Wada K, Yamanaka M, Kamiya I and Nakajima H. 2016. Precursory slope deformation around landslide area detected by InSAR throughout Japan//The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Prague, Czech Republic: [s. n.], XLI-B1: 1201-1205 [DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B1-1201-2016]
- Perissin D and Wang T. 2012. Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(1): 271-280 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2160644]
- Raucoules D, Cartannaz C, Mathieu F and Midot D. 2013. Combined use of space-borne SAR interferometric techniques and ground-

- based measurements on a 0.3 km<sup>2</sup> subsidence phenomenon. *Remote Sensing of Environment*, 139: 331-339 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.016]
- Rott H, Scheuchl B, Siegel A and Grasemann B. 1999. Monitoring very slow slope movements by means of SAR interferometry: a case study from a mass waste above a reservoir in the Ötztal Alps, Austria. *Geophysical Research Letters*, 26(11): 1629-1632 [DOI: 10.1029/1999GL900262]
- Schmidt D A and Bürgmann R. 2003. Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara Valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B9): 2416 [DOI: 10.1029/2002jb002267]
- Shi X G, Yang C, Zhang L, Jiang H J, Liao M S, Zhang L and Liu X G. 2019. Mapping and characterizing displacements of active loess slopes along the upstream Yellow River with multi-temporal InSAR datasets. *Science of the Total Environment*, 674: 200-210 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.140]
- Shi X G, Zhang L, Liao M S and Shi S. 2018. Monitoring three dimensional displacements of the shuping landslide, Three Gorges area with multi-temporal TerraSAR-X SAR images//IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia, Spain: IEEE: 478-481 [DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8519055]
- Shi X G, Zhang L, Xu Q, Zhao K Y, Dong J, Jiang H J and Liao M S. 2019. Monitoring slope displacements of loess terrace using time series InSAR analysis technique. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7): 1027-1034 (史绪国, 张路, 许强, 赵宽耀, 董杰, 蒋厚军, 廖明生. 2019. 黄土台塬滑坡变形的时序 InSAR 监测分析. *武汉大学学报·信息科学版*, 44(7): 1027-1034) [DOI: 10.13203/j.whugis20190056]
- Singleton A, Li Z, Hoey T and Muller J P. 2014. Evaluating sub-pixel offset techniques as an alternative to D-InSAR for monitoring episodic landslide movements in vegetated terrain. *Remote Sensing of Environment*, 147: 133-144 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.003]
- Strozzi T, Caduff R, Wegmüller U, Raetzo H and Hauser M. 2017. Widespread surface subsidence measured with satellite SAR interferometry in the Swiss alpine range associated with the construction of the Gotthard Base Tunnel. *Remote Sensing of Environment*, 190: 1-12 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.007]
- Strozzi T, Klimeš J, Frey H, Caduff R, Huggel C, Wegmüller U and Rapre A C. 2018. Satellite SAR interferometry for the improved assessment of the state of activity of landslides: a case study from the Cordilleras of Peru. *Remote Sensing of Environment*, 217: 111-125 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.014]
- Strozzi T, Luckman A, Murray T, Wegmüller U and Werner C L. 2002. Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2384-2391 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.805079]
- Sun L Y, Muller J P and Chen J S. 2017. Time series analysis of very slow landslides in the Three Gorges region through small baseline SAR offset tracking. *Remote Sensing*, 9(12): 1314 [DOI: 10.3390/rs9121314]
- Tarchi D, Casagli N, Fanti R, Leva D D, Luzi G, Pasuto A, Pieraccini M and Silvano S. 2003. Landslide monitoring by using Ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy. *Engineering Geology*, 68(1/2): 15-30 [DOI: 10.1016/S0013-7952(02)00196-5]
- Tarchi D, Rudolf H, Luzi G, Chiarantini L, Coppo P and Sieber A J. 1999. SAR interferometry for structural changes detection: a demonstration test on a dam//IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Hamburg, Germany: IEEE, 3: 1522-1524 [DOI: 10.1109/IGARSS.1999.772006]
- Tong X P and Schmidt D. 2016. Active movement of the Cascade landslide complex in Washington from a coherence-based InSAR time series method. *Remote Sensing of Environment*, 186: 405-415 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.09.008]
- Wang T, Jónsson S and Hanssen R F. 2014. Improved SAR image coregistration using pixel-offset series. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(9): 1465-1469 [DOI: 10.1109/LGRS.2013.2295429]
- Wang X W, Liu G X, Yu B, Dai K R, Zhang R, Ma D Y, Li Z L. 2015. An integrated method based on DInSAR, MAI and displacement gradient tensor for mapping the 3D coseismic deformation field related to the 2011 Tarlay earthquake (Myanmar). *Remote Sensing of Environment*, 170: 388-404 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.09.024]
- Wasowski J and Bovenga F. 2014. Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: current issues and future perspectives. *Engineering Geology*, 174: 103-138 [DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.03.003]
- Wegmüller U, Werner C and Strozzi T. 1998. SAR interferometric and differential interferometric processing chain//Sensing and Managing the Environment. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing. Symposium Proceedings. Seattle, WA, USA: IEEE, 2: 1106-1108 [DOI: 10.1109/IGARSS.1998.699687]
- Xia Y, Kaufmann H and Guo X F. 2004. Landslide monitoring in the Three Gorges area using D-InSAR and corner reflectors. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(10): 1167-1172 [DOI: 10.14358/PERS.70.10.1167]
- Yu C, Li Z H, Penna N T and Crippa P. 2018. Generic atmospheric correction model for Interferometric Synthetic Aperture Radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(10): 9202-9222 [DOI: 10.1029/2017JB015305]
- Yun Y, Lü X L, Fu X K and Xue F Y. 2020. Application of spaceborne interferometric synthetic aperture radar to geohazard monitoring. *Journal of Radars*, 9(1): 73-85 (云焱, 吕孝雷, 付希凯, 薛飞扬. 2020. 星载 InSAR 技术在地质灾害监测领域的应用. *雷达学报*, 9(1): 73-85) [DOI: 10.12000/JR20007]
- Zebker H A, Rosen P A, Goldstein R M, Gabriel A and Werner C L. 1994. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: the Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B10): 19617-19634

- [DOI: 10.1029/94JB01179]
- Zebker H A, Rosen P A and Hensley S. 1997. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B4): 7547-7563 [DOI: 10.1029/96jb03804]
- Zhang L, Ding X L and Lu Z. 2011. Modeling PSInSAR time series without phase unwrapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1): 547-556 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2052625]
- Zhang L, Liao M S, Dong J, Xu Q and Gong J Y. 2018. Early detection of landslide hazards in mountainous Areas of West China using Time Series SAR Interferometry-A case study of Danba, Sichuan. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43(12): 2039-2049 (张路, 廖明生, 董杰, 许强, 龚健雅. 2018. 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. *武汉大学学报·信息科学版*, 43(12): 2039-2049) [DOI: 10.13203/j.whugis20180181]
- Zhang Y. 2018. Detecting ground deformation and investigation landslides using InSAR technique-Taking middle reach of Bailong River Basin as an example. Lanzhou: Lanzhou University (张毅. 2018. 基于 InSAR 技术的地表变形监测与滑坡早期识别研究——以白龙江流域中游为例. 兰州: 兰州大学)
- Zhang Y, Meng X M, Dijkstra T A, Jordan C J, Chen G, Zeng R Q and Novellino A. 2020. Forecasting the magnitude of potential landslides based on InSAR techniques. *Remote Sensing of Environment*, 241: 111738 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111738]
- Zhang Y D, Li Y D, Dong J, Fan Q, Che B, Zhang L, Zhou Y and Liao M S. 2019. Landslide hazard detection in Markam with time-series InSAR analyses. *Journal of Remote Sensing*, 23(5): 987-996 (张亚迪, 李煜东, 董杰, 范强, 车彬, 张路, 周杨, 廖明生. 2019. 时序 InSAR 技术探测芒康地区滑坡灾害隐患. *遥感学报*, 23(5): 987-996) [DOI: 10.11834/jrs.20198025]
- Zhao C Y, Lu Z, Zhang Q and de La Fuente J. 2012. Large-area landslide detection and monitoring with ALOS/PALSAR imagery data over Northern California and Southern Oregon, USA. *Remote Sensing of Environment*, 124: 348-359 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.05.025]
- Zhao C Y, Liu X J, Zhang Q, Peng J B and Xu Q. 2019. Research on loess landslide identification, monitoring and failure mode with InSAR technique in Heifangtai, Gansu. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7): 996-1007 (赵超英, 刘晓杰, 张勤, 彭建兵, 许强. 2019. 甘肃黑方台黄土滑坡 InSAR 识别、监测与失稳模式研究. *武汉大学学报·信息科学版*, 44(7): 996-1007) [DOI: 10.13203/j.whugis20190072]
- Zhu J J, Li Z W and Hu J. 2017. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1717-1733 (朱建军, 李志伟, 胡俊. 2017. InSAR 变形监测方法与研究进展. *测绘学报*, 46(10): 1717-1733) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170350]
- Zhu J J, Yang Z F and Li Z W. 2019. Recent progress in retrieving and predicting mining-induced 3D displacements using InSAR. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 48(2): 135-144 (朱建军, 杨泽发, 李志伟. 2019. InSAR 矿区地表三维形变监测与预计研究进展. *测绘学报*, 48(2): 135-144) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180188]
- Zhu Q, Zeng H W, Ding Y L, Xie X, Liu F, Zhang L G, Li H F, Hu H, Zhang J X, Chen L, Chen L, Zhang P C and He H G. 2019. A review of major potential landslide hazards analysis. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 48(12): 1551-1561 (朱庆, 曾浩炜, 丁雨淋, 谢潇, 刘飞, 张利国, 李海峰, 胡翰, 张骏骁, 陈力, 陈琳, 张鹏程, 何华贵. 2019. 重大滑坡隐患分析方法综述. *测绘学报*, 48(12): 1551-1561) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190452]

## Application of InSAR technology in landslide hazard: Progress and prospects

LI Xiaoen<sup>1,2,3,4</sup>, ZHOU Liang<sup>1,2,3,4</sup>, SU Fenzhen<sup>2,5</sup>, WU Wenzhou<sup>2,5</sup>

1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China;

3. National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China;

4. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China;

5. Collaborative Innovation Center of South China Sea Studies, Nanjing 210023, China

**Abstract:** InSAR technology, one of the important earth observation technologies, has been widely used and explored in the field of surface deformation monitoring, such as city, mine, and geological disaster, especially in landslide deformation monitoring. This study systematically expounded and summarized the relevant progress worldwide in recent years from three aspects of InSAR methods, thematic

fields, and existing problems. This task is conducted to fully and accurately understand the frontier scientific problems of the InSAR technology in landslide disaster application and sort out its limitations, challenges, and future development trend. Moreover, this work is carried out to better serve the landslide disaster control and monitoring. The specific content includes the following aspects:

(1) Based on the overview of the main InSAR methods used in landslide monitoring, our research comprehensively reviewed and summarized the application scope, advantages, and disadvantages and internal relations of various InSAR methods. A reasonable understanding of the characteristics of various methods is an important part of the scientific design of the InSAR landslide application monitoring scheme.

(2) We analyzed the four relevant topics in recent years regarding InSAR landslide early identification and detection, deformation monitoring of different magnitudes, activity patterns, and 3D information acquisition, and coupling of deformation and inducement. This work focused on the cases of major outstanding innovations in the existing applications and summarized the deficiencies and challenges of the corresponding topic content in the current research. First, starting from the early identification of InSAR landslide, a research hotspot, comparative analysis, and discussion are made on its research scenes by country and situation. In view of the different characteristics of the deformation variables at various stages of landslides, this research focused on the effective monitoring and acquisition of landslide deformation information, landslide movement patterns, and 3D landslide information. This work discussed in detail the progress made in the past and current problems. Then, this work demonstrated the application boundaries and effective auxiliary methods of different InSAR technologies in landslide monitoring and made a comprehensive and in-depth analysis of the development of InSAR technologies. This work focused on the analysis of the current InSAR technology and data on the progress of landslide activity mode information acquisition and landslide 3D deformation research. Moreover, this work summarized the advantages and disadvantages of various methods that can obtain 3D landslide information. Finally, this work briefly discussed the current progress and inadequacies related to the coupling of InSAR deformation and incentives and the multisource/metalandslide monitoring cases with InSAR as the main supplement to other remote sensing technologies.

(3) The limitations of the InSAR technology system and the characteristics of landslide disasters were summarized according to the research progress made under the existing conditions. We analyzed the problems of geometric distortion, dense vegetation coverage, atmospheric interference, 3D deformation information acquisition, accuracy evaluation, complexity, and nonlinearity of landslide deformation in InSAR landslide monitoring. This work also provided concrete and feasible solutions and recommended measures for solving the corresponding problems in this research.

(4) From the perspective of the construction of the InSAR landslide industry system, we combined artificial intelligence, machine learning, UAV remote sensing, seismic network in the field of geosciences, and other observation technologies in our analysis. In view of data processing and integration with other new technologies, the future research of InSAR in landslide applications was summarized and prospected.

**Key words:** remote sensing, InSAR, landslides, geological hazards, deformation monitoring, research progress

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. 41961027, 41701173); Gansu Feitian Scholar Youth Expert Support Program, LZJTU EP (No. 201806)