

doi: 10.12029/gc20240515001

陶昶旭, 张永双, 任三绍. 2025. InSAR 技术在滑坡识别与监测中的应用研究进展[J]. 中国地质, 52(2): 513–526.

Tao Changxu, Zhang Yongshuang, Ren Sanshao. 2025. Research progress of InSAR technology application on landslide identification and monitoring[J]. Geology in China, 52(2): 513–526(in Chinese with English abstract).

InSAR 技术在滑坡识别与监测中的应用研究进展

陶昶旭^{1,2,3}, 张永双^{1,2,3}, 任三绍^{1,2,3}

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)地质安全研究院, 北京 100083; 3. 中国地质大学(北京)郑州研究院, 河南 郑州 450001)

摘要:【研究目的】滑坡灾害是威胁山区重大工程建设与人类生命财产安全的主要地质灾害类型, 滑坡灾害早期识别与监测预警已成为有效防范灾害风险的重要途径。【研究方法】根据文献资料, 本文介绍了 InSAR 技术的基本原理及其发展历程, 梳理了 InSAR 技术在滑坡灾害识别与监测中的应用研究现状。【研究结果】滑坡 InSAR 识别主要包括区域性滑坡识别、重点区段滑坡识别和单体滑坡精准识别; 滑坡 InSAR 监测主要针对具有重大险情的大型单体滑坡, 着重阐述了监测方法选取和预警模型方面的研究进展。在此基础上, 指出了当前 InSAR 技术在滑坡识别与监测研究中面临的主要挑战: 复杂地形条件下侧视成像几何畸变挑战、滑坡大梯度形变探测挑战、大气延迟及植被穿透的挑战等。InSAR 技术在滑坡应用中还存在着大范围监测能力不足、处理流程自动化程度较低、数据分析与挖掘程度不够等问题。【结论】对 InSAR 技术未来在滑坡识别与监测中的发展方向进行了展望。伴随着未来 InSAR 技术应用水平的不断提升, 将使滑坡灾害风险防范水平提升至新的高度。

关键词: 滑坡灾害; InSAR 技术; 早期识别; 监测预警; 人工智能; 地质调查工程

创新点: 从区域性滑坡识别、重点区段滑坡识别和单体滑坡识别三个层次梳理了 InSAR 技术在滑坡识别中的应用, 着重阐述了应用 InSAR 技术开展滑坡监测的方法选取与预警模型方面的研究, 探讨了未来的研究趋势与发展方向。

中图分类号: P237; P642.22 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)02-0513-14

Research progress of InSAR technology application on landslide identification and monitoring

TAO Changxu^{1,2,3}, ZHANG Yongshuang^{1,2,3}, REN Sanshao^{1,2,3}

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. China University of Geosciences (Beijing), Institute of Geosafety, Beijing 100083, China; 3. Zhengzhou Institute, China University of Geosciences (Beijing), Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] Landslides pose a significant risk to major constructions and human safety in mountainous areas, and the early identification and monitoring of landslide has become an important way to prevent risk. **[Methods]** This paper briefly introduces the

收稿日期: 2024-05-15; 改回日期: 2024-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(42342055、42307229)与河南省自然科学基金项目(252300421291)联合资助。

作者简介: 陶昶旭, 男, 1999 年生, 博士生, 主要从事工程地质与地质灾害研究; E-mail: changxu_tao@email.cugb.edu.cn。

通信作者: 张永双, 男, 1968 年生, 教授, 主要从事工程地质与地质灾害研究; E-mail: zhys100@cugb.edu.cn。

basic principle of InSAR technology and its development history, and introduces the current research status of its application in landslide identification and monitoring. **[Results]** The three types of landslide InSAR identification are regional, key sections and single landslide. InSAR monitoring of landslides mainly focuses on large landslides with significant risk, and highlights the research progress in monitoring method and early warning modeling. On this basis, the main challenges faced by InSAR technology in landslide identification and monitoring research at this stage are pointed out, including: the challenge of geometrical distortion in side-view imaging under complex terrain conditions, detecting large gradient deformation of landslides, atmospheric delays and vegetation penetration, etc. InSAR technology in landslide application still exists problems such as insufficient capacity of large-scale monitoring, low degree of automation of processing process, and insufficient degree of data analysis and mining. **[Conclusions]** The future development direction of InSAR technology in landslide identification and monitoring is prospected. With the continuous improvement of the application level of InSAR technology, it will effectively promote the new leap in landslide disaster risk prevention.

Key words: landslide; InSAR technology; early identification; monitoring and early warning; artificial intelligence; geological survey engineering

Highlights: The application of InSAR technology in landslide identification is summarized at three levels: Regional landslide identification, key section landslide identification and monolithic landslide identification, focusing on the method selection and early warning modeling of landslide monitoring using InSAR technology, and discussing the future research trends and development directions.

About the first author: TAO Changxu, male, born in 1999, Ph.D. candidate, mainly engaged in engineering geology and geological hazard research; E-mail: changxu_tao@email.cugb.edu.cn.

About the corresponding author: ZHANG Yongshuang, male, born in 1968, professor, mainly engaged in engineering geology and geological hazards research; E-mail: zhys100@cugb.edu.cn.

Fund support: Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.42342055, No.42307229) and the Natural Science Foundation of Henan Province (No.252300421291).

1 引 言

滑坡灾害是威胁山区重大工程建设与人类生命财产安全的主要地质灾害类型,每年在全球范围内都会造成重大人员伤亡与财产损失(许强等, 2023; Casagli et al., 2023)。滑坡灾害隐患早期识别与监测预警是有效防范灾害风险的重要途径。传统的滑坡隐患识别主要依赖于地面调查,滑坡监测预警则主要依赖于地面监测设备(如全球导航卫星系统(GNSS)、测斜仪、裂缝计、雨量计等)(许强等, 2019; Dai et al., 2020)。在全球滑坡研究领域的快速发展过程中,传统方法在面对大范围滑坡隐患识别、高山峡谷区高位滑坡识别与监测、茂密植被覆盖下滑坡识别等问题时存在明显的局限性,迫切需要全新的技术克服当前所面临的难题(Casagli et al., 2023)。

伴随着航空航天和遥感技术的不断进步,合成孔径雷达干涉(Interferometric Synthetic Aperture

Radar, InSAR)技术凭借其能够在大范围全天候、全天时地连续精确跟踪地面微小形变,且受大气和季节影响不大的优势(Rodriguez and Martin, 1992; 李德仁等, 2000; 葛大庆等, 2007; 赵超英等, 2019),在一众遥感技术手段中脱颖而出,被广泛应用于滑坡灾害早期识别与监测预警中。该技术通过利用同一轨道两景 SAR 影像,精密配准后共轭相乘得到干涉相位,再从中减去由外部 DEM 模拟的地形相位,从而获取地面目标的形变信息(刘国祥等, 2019)。InSAR 技术的广泛应用有效克服了传统技术手段的局限性,促进了滑坡识别与监测研究的快速发展。

为进一步总结 InSAR 技术在滑坡应用研究中的进展及存在的主要问题,本文简要介绍了 InSAR 技术的发展历程;从广域范围、重点区段和单体滑坡 3 个层次,总结了 InSAR 技术在滑坡灾害早期识别的应用情况;结合典型案例梳理了滑坡 InSAR 监测预警的研究进展,并分析了当前面临的主要挑

战;最后对未来滑坡灾害研究领域 InSAR 技术的发展方向提出了建议。

2 InSAR 技术的发展历程

InSAR 技术发展至今已有近半个世纪的历程,其在滑坡领域的应用大致可分为:起步阶段、快速发展阶段和成熟阶段。

2.1 起步阶段

1978 年美国发射了世界上第一颗星载 SAR 卫星 SEASAT, 获取了地球表面大量的雷达干涉数据, 为 InSAR 技术的早期发展奠定了基础(李振洪等, 2023)。InSAR 技术早期主要应用于地形测绘领域(Bamler and Hartl, 1998), 受限于当时 SAR 卫星的性能(时空分辨率、重访周期等), 整体发展较为缓慢。

自 20 世纪 90 年代开始, 以 ERS-1/2(欧空局)、JERS-1(日本)为代表的 SAR 卫星相继发射升空, SAR 数据的时空分辨率得到较大的改善。这一时期采用的差分干涉合成孔径雷达(D-InSAR)测量技术, 精度可达厘米级至毫米级, 开始逐步被应用在高精度 DEM 测量(Small et al., 1998)、地表沉降测量(Galloway et al., 1998)、植被覆盖下的地形测量(Askne et al., 1997)、冰川移动(Mattar et al., 1998)、洋流特征(Bao et al., 1997)、地震地表变形测量(Price and Sandwell, 1998)等领域。随后, Price and Sandwell(1998)提出了 Stacking-InSAR 技术, 通过对多幅解缠干涉图进行加权平均, 与 D-InSAR 相比, 能够明显消除大气相位延迟误差的影响, 使 InSAR 技术的准确性与实用性得到了较大提升。

2.2 快速发展阶段

进入 21 世纪后, 日本 ALOS、德国 TerraSAR-X、意大利 COSMO-SkyMed 等卫星陆续升空, 全球范围内的 SAR 卫星逐步覆盖了 X、C、S、L 等常用 SAR 数据波段(Metternicht et al., 2005), SAR 卫星的重访周期也有所降低, 数据时空分辨率提升显著。与此同时, InSAR 领域也诞生了诸多先进技术, Ferretti et al.(2001)提出了 PS-InSAR 技术, 能够在获取地表变形的时间序列的同时, 减小时空失相干、大气延迟与轨道误差; Berardino et al.(2002)提出了 SBAS-InSAR 技术, 通过时空滤波去除大气延迟, 减少大气误差的影响, 获取地表变形的时间序

列; Hooper et al.(2004)提出的 StaMPS 技术则采用了相位时域分析算法, 通过对相位时间域分析来判断相位是否具有时域稳定性。

除此之外, 多孔径雷达干涉测量方法(MAI)、分频干涉测量(R-SSI)等解决大范围变形、大梯度变形等技术被广泛应用(Bamler and Eineder, 2005; Jung et al., 2009), InSAR 技术探测能力飞速提高, InSAR 技术开始向滑坡领域迅速拓展。例如, Hilley et al.(2004)将 InSAR 技术用于识别监测美国大规模缓慢移动、连续蠕变的滑坡; Ye et al.(2004)应用 D-InSAR 技术成功对三峡库区滑坡开展了监测; Delacourt et al.(2007)采用 InSAR 技术对法国 La Clapière 滑坡进行监测, 并比较了 PS-InSAR 技术与 D-InSAR 在不同情况下的适用性。这一阶段 InSAR 技术的功能性得到了较大的拓展, 为该技术在滑坡领域的全面应用奠定了基础。

2.3 成熟阶段

2010 年至今, 欧空局 Sentinel-1 卫星, 日本 ALOS-2 卫星、美国 NISAR 卫星以及中国研制的 HJ-1C、GF-3、LT-1 等多波段、高时空分辨率、低重访周期的 SAR 卫星入轨, 使得运用 InSAR 技术进行高精度、高频次地表形变探测成为可能, InSAR 技术在滑坡研究中的应用进入成熟阶段(李振洪等, 2023)。

在这一阶段, Ferretti et al.(2011)提出了被称为第二代 PS-InSAR 的 SqueeSAR 技术, 从永久散射体(PS)与分布式散射体(DS)中联合提取地表参数, 克服了 PS-InSAR 在观测目标中永久散射体目标过少的限制(Carla et al., 2019; 李振洪等, 2022), 提升监测点的密度, 从而提高滑坡监测精度(Liu et al., 2022b)。此外, Offset-Tracking、多维小基线子集(MSBAS-2D/3D)、多平台联合建模等 InSAR 技术的突破, 使得过去 InSAR 技术仅能获取雷达视线向(LOS)的干涉测量成为历史, 并可开展地表形变的二维、三维探测(Hu et al., 2013; Samsonov et al., 2020)。同时, Sequential-InSAR 技术的诞生使得 InSAR 技术由过去的静态观测逐步转向动态观测(Wang et al., 2019; Zhang et al., 2023a), Hrysiwicz et al.(2023)开发的 EZ-InSAR 程序基本实现了常见 InSAR 处理流程的自动化。时至今日, InSAR 技术已成为滑坡灾害早期识别与监测预警不可或缺的重要技术手段, 常见的 InSAR 技术对比见表 1。

表 1 常见 InSAR 技术对比 (据李晓恩等, 2021; 李振洪等, 2022)

Table 1 Comparison of common InSAR technologies (after Li Xiaoen et al., 2021; Li Zhenhong et al., 2022)					
技术方法	诞生年份	核心原理	核心优势	局限性	适用范围
D-InSAR	1989	通过分离干涉相位中除地表形变相位以外的其他相位贡献, 得到差分干涉数据	数据量少、计算效率高, 厘米级形变探测	易受失相干、大气延迟影响	广域范围滑坡早期识别
InSAR-Stacking	1998	对一段时间内的解缠相位进行加权平均, 估计大区域的平均形变速率场	削弱大气延迟误差, 提高干涉影像信噪比	只能获取形变速率, 无法获取时间序列形变	广域范围滑坡早期识别
PS-InSAR	2000	通过覆盖同一地区的多景 SAR 影像的永久散射体 (PS 点) 减少失相干, 获取高精度的地面时间序列形变信息	精确估计和消除大气效应带来的相位误差	PS 点较少的效果较差	永久散射体密度较高区
SBAS-InSAR	2004	选取较短时间和空间基线阈值内的干涉影像用于时间序列分析, 最终得到稳定可靠的时间序列形变	无需考虑时空基线和主影像选择问题, 运算效率高	高相干点选取难, 易损失细节信息	植被覆盖较低且形变梯度较小
R-SSI	2005	通过距离向带通滤波将一景 SAR 影像划分为上频带和下频带两景影像分别进行干涉处理, 获取大梯度形变量	探测大梯度形变	小梯度形变探测精度低	滑坡大变形探测, 强震形变监测
MAI	2006	对主辅影像的前、后视影像分别进行干涉处理, 获得前后视的差分相位, 进而转化为轨道飞行方向的形变量	抑制大气相位延迟、提取地表三维形变	低相干区适用性低, 精度受限于相干性	识别具有大形变梯度的滑坡
SqueeSAR	2011	通过统计方法保留相位稳定的 DS 点并与 PS 点联合求解时间序列形变	无需考虑时空基线, 所有干涉图均参与计算、数据利用率高	计算效率低, 不适用于广域范围监测	单体滑坡精细监测

3 基于 InSAR 技术的滑坡识别

3.1 InSAR 滑坡识别的应用类型

InSAR 技术进行滑坡识别的本质是通过地表的异常形变区进行滑坡识别 (Klees and Massonnet, 1998), 按照识别范围可分为: 广域范围识别、重点区段识别和单体滑坡识别 (图 1)。不同识别类型对应的目标、特点、精度等有所不同, 因此在 SAR 数据类型及 InSAR 技术选择上存在一定的差异 (表 2, 表 3)。

3.2 InSAR 在广域滑坡识别中的应用

广域滑坡识别的主要目的是找到区域内潜在滑坡的位置, 探明滑坡的空间分布规律, 具有识别范围大、数据处理量大、识别灾害数量多、区域内地形地貌类型多的特点, 可有效识别大—中型滑坡, 对小型滑坡的识别能力十分有限。在 SAR 数据选择上, 通常选取覆盖范围较大 (面积达数千至上万平方千米) 的数据, 处理过程中需要联合升降轨的 SAR 数据, 在保证识别效率的同时, 尽可能避免由于卫星侧视成像所带来的几何畸变, InSAR 技术选择上则偏向于处理步骤简捷、运算效率较高且具有较强适应性的技术。

国内外不少学者开展了广域范围的滑坡隐患识别研究, 姚鑫等 (2020) 在 D-InSAR 的基础上设计

了 PRE-InSAR 技术, 通过相位增强来突出滑坡位置, 能够克服诸多不利干涉条件以增加技术的适应能力, 该技术在青藏高原三江并流区域、黄土高原区域识别到了大量潜在的滑坡隐患; 张本浩等 (2022) 选取升降轨 SAR 数据减小了各类地形地貌所带来的几何畸变, 同时应用 Stacking-InSAR 技术削弱数字高程与大气误差的影响, 识别了青藏高原然乌地区 67 处潜在滑坡; Aslan et al. (2020) 应用模块化程度较高的 StaMPS 技术, 在法国阿尔卑斯山地区识别了 100 多个潜在滑坡, 对广域范围滑坡风险防控具有重要意义。

3.3 InSAR 在重点区段滑坡识别中的应用

相较于广域范围识别, 重点区段内滑坡特征更加明确, 应用 InSAR 技术能精确识别绝大部分滑坡隐患, 甚至传统人工调查不易发觉的中小规模滑坡也能有效识别, 识别结果的准确性和可靠性较高。InSAR 识别精度一方面取决于 SAR 数据, 另一方面取决于 InSAR 处理技术 (Moreira et al., 2013; 李振洪等, 2019), 重点区段 SAR 数据的选取需充分考虑区域内的地质条件、植被覆盖、大气延迟等因素, InSAR 技术的选取则需考虑滑坡规模、滑动速度等因素 (李晓恩等, 2021; 李振洪等, 2022), 在二者选取得当的情况下才能得到理想的识别结果。当前 InSAR 技术在工程规划建设区、重点流

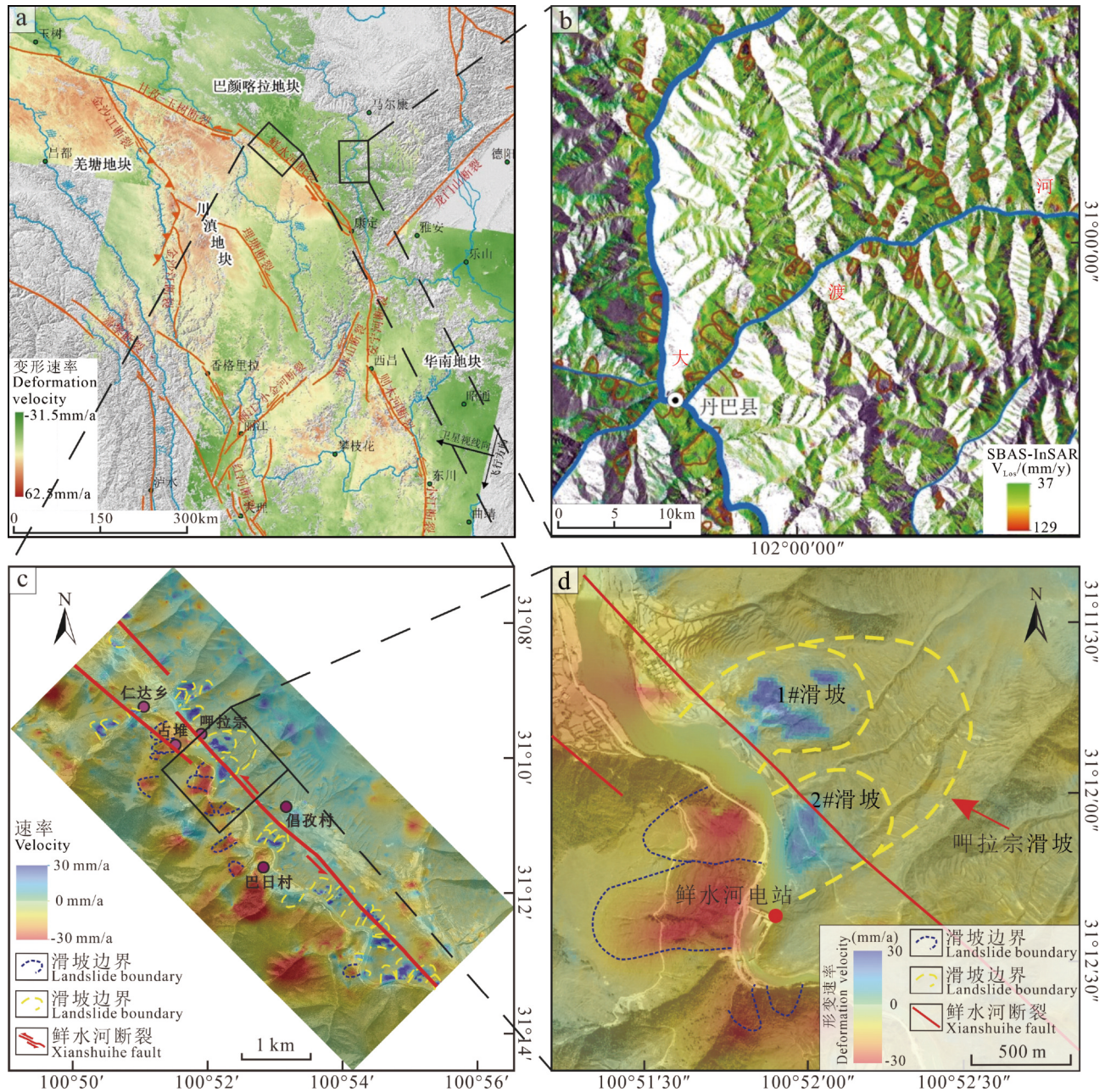


图 1 InSAR 滑坡隐患识别(据刘筱怡等, 2019 修改)

a—广域滑坡识别; b—重点流域滑坡识别; c—重要活动断裂带滑坡识别; d—单体滑坡识别; 图 c、d 中黄色滑坡边界为识别出的沿近西北方向(沿雷达视线(LOS)方向沉降)发生形变的滑坡边界, 蓝色滑坡边界为识别出的沿近东南方向(沿雷达视线(LOS)方向隆升)发生形变的滑坡边界

Fig.1 InSAR landslide hazard identification (modified from Liu Xiaoyi et al., 2019)

a—Wide-area landslide identification; b—Key river basin landslide identification; c—Active fracture zone landslide identification; d—Monolithic landslide identification; The yellow landslide boundaries in Fig. c and d represent the identified deformation zones along the approximately northwest direction (subsidence in the radar line of sight (LOS) direction), while the blue landslide boundaries denote the identified deformation zones along the approximately southeast direction (uplift in the radar line of sight (LOS) direction)

域、活动断裂带等重点区段的滑坡识别, 受到学界广泛关注。

3.3.1 工程规划建设区

在水电工程、铁路、公路等工程规划建设区,

Reyes-Carmona et al.(2020)利用 D-InSAR 技术精确捕捉地表小微形变的能力, 识别了西班牙南部 Rules 水库的 3 个潜在滑坡, 并分析了不稳定斜坡对水电设施造成的影响; 刘星洪等(2020)结合 4 种

表 2 SAR 数据各频带的应用领域 (据 Moreira et al., 2013)

Table 2 Application areas of SAR data in various frequency bands (after Moreira et al., 2013)				
频带名称	X	C	S	L
波长/cm	2.5~4.0	4.0~8.0	8.0~15.0	15.0~30.0
代表SAR卫星	TerraSAR、COSMO-SkyMed	Sentinel-1、高分三号	HJ-1C	ALOS 2、陆地探测一号
特点	高分辨率成像	普适性较强	较强穿透性	强穿透性

表 3 滑坡速度等级分类

Table 3 Classification of landslide velocity classes		
等级分类	形变速率	可应用的代表性InSAR技术
极其缓慢	<16 mm/a	D-InSAR、PS-InSAR、SBAS-InSAR、SqueeSAR
非常缓慢	16 mm/a~1.6 m/a	D-InSAR、InSAR-stacking
缓慢	1.6 m/a~13 m/月	MAI、R-SSI
中等	13 m/月~1.8 m/h	R-SSI
快速	1.8 m/h~3 m/min	
非常快速	3 m/min~5 m/s	地基SAR
极其快速	>5 m/s	

SAR 数据,应用 D-InSAR 技术识别了川藏廊道巴塘—芒康段 167 处滑坡,表明 InSAR 技术可精准捕捉滑坡变形初期的微小变形;Zhao et al.(2019)运用 SBAS-InSAR 技术结合随机森林算法,识别了喀喇昆仑公路沿线的滑坡隐患,并绘制了公路周边滑坡的易发性评价图。

3.3.2 重点流域

在金沙江、岷江、大渡河等重点流域,河流下切作用强烈,岩体结构破碎,滑坡较为发育(冉涛等,2024)。刘斌等(2020)应用 TOPS 和 ScanSAR 模式 InSAR 技术对金沙江中下游开展了滑坡隐患识别;Shan et al.(2024)采用 InSAR 技术在岷江上游杂谷脑河流域识别出 49 个滑坡,并结合随机森林算法完成了滑坡易发性评估;Huang et al.(2023)基于 JS-InSAR 与 SBAS-InSAR 技术,在大渡河金川至峨边段识别出 143 个潜在滑坡,提升了对重点流域滑坡隐患的认识。

3.3.3 重要活动断裂带

大型活动断裂带附近,斜坡结构易发生破坏,是巨型滑坡易发区域。Scheingross et al.(2013)应用 InSAR 技术识别了美国加州圣安德烈斯断裂带发育的滑坡,并分析了断裂附近滑坡的空间分布特征;姚鑫等(2017)应用相干永久目标分析干涉测量(IPTA-InSAR)技术,开展了鲜水河断裂带蠕滑型滑坡识别,证实了活动断裂带对滑坡空间发育规律的控制作用;刘筱怡等(2019)应用 SBAS-InSAR 技术

发现,靠近活动断裂附近的斜坡大都存在明显的蠕滑变形。

3.4 单体滑坡精准识别

单体滑坡的识别主要关注滑坡不同部位的形变特征,进而定量分析滑坡稳定性与变形趋势。相较于广域范围和重点区段滑坡识别,单体滑坡识别有明确的识别对象(具体斜坡)。单体滑坡识别首先需要保证能够对滑坡边界及形变演化过程实现精准探测。Gao et al.(2023)通过分析多期 InSAR 数据,精确识别出西藏易贡滑坡源区的主要变形区域,并测量出这些区域的位移速率和累积位移量,为评估滑坡的稳定性和预测滑坡的变形趋势提供了重要数据支撑;Wang et al.(2023)运用 PS-InSAR、SBAS-InSAR 及 CTL 方法分别对湖北马哲县沙子坝滑坡进行识别,分析了不同时序 InSAR 技术的识别效果,认为不同的 InSAR 技术对同一滑坡的识别结果存在差异,拥有更大测点密度的 InSAR 方法能更精确地刻画滑坡变形特征。

在保证精准性的同时,部分学者为刻画滑坡在三维空间的运动过程,开展了滑坡多维度形变探测研究。Liu et al.(2020)提出了一种偏移跟踪方法来处理 SAR 图像,成功获取了金沙江白格滑坡的高精度二维形变;杨超等(2023)利用时序 InSAR 技术,根据卫星视线向与滑坡的空间几何关系,解算获取了桃坪乡滑坡表面的二维形变,并进一步实现了滑坡深度的反演计算。

4 基于 InSAR 技术的滑坡监测预警

4.1 基于 InSAR 技术的滑坡监测

滑坡是斜坡长期演化的结果,在此过程中滑坡的内外部会产生一系列变化(张永双等, 2021)。传统的滑坡监测方法主要从驱动力、内部破裂、外在形变以及临滑前兆等方面入手,重点监测相关指标的量值及其动态变化范围,最终为滑坡预警预报提供参考(许强等, 2023; Casagli et al., 2023)。采用时序 InSAR 技术能够获取不同演化阶段滑坡的形变特征,张永双等(2020)总结了单体滑坡 InSAR 早期识别与监测的一般步骤:①分析滑坡及周边主要 SAR 数据源及其适宜性,制定最优 InSAR 监测方案;②通过 InSAR 综合观测,获得滑坡长时间序列变形并筛选显著变形部位(特征点);③根据特征点的时序变形曲线,进行滑坡的演化阶段判别和稳定性预测(图 2)。PS-InSAR 与 SBAS-InSAR 技术是当前应用于滑坡监测最具代表性的两种时序 InSAR 技术。

4.1.1 基于 PS-InSAR 的滑坡监测

PS-InSAR 技术通过识别 SAR 数据中的永久散射体(PS 点),利用长基线距的干涉图像对,提高干涉图像的利用率,能获得毫米级的地表位移量。朱同同等(2021)运用该技术获取了三峡库区树坪滑坡的时序变形速率曲线,与 GPS 形变观测值比较,验证了监测结果的有效性;Zhang et al.(2023b)应用 PS-InSAR 技术对金沙江上游茶树山古滑坡复活变形进行了监测,为古滑坡复活机制研究提供了重要依据。

4.1.2 基于 SBAS-InSAR 的滑坡监测

在监测区域缺少永久散射体或永久散射体密度较低时 PS-InSAR 技术会产生较大的误差。因此滑坡监测常选用适应性更强的 SBAS-InSAR 技术。李梦华等(2021)应用 SBAS-InSAR 技术,对茂县岷江河谷段多个典型滑坡进行了时间序列形变分析;闫怡秋等(2022)运用 SBAS-InSAR 技术结合光学遥感解译,监测了大渡河甲居滑坡的二维形变速率,大大提升了滑坡的监测效果。

大量研究表明,PS-InSAR 与 SBAS-InSAR 技术均为有效的滑坡监测手段,但单一技术难以兼容

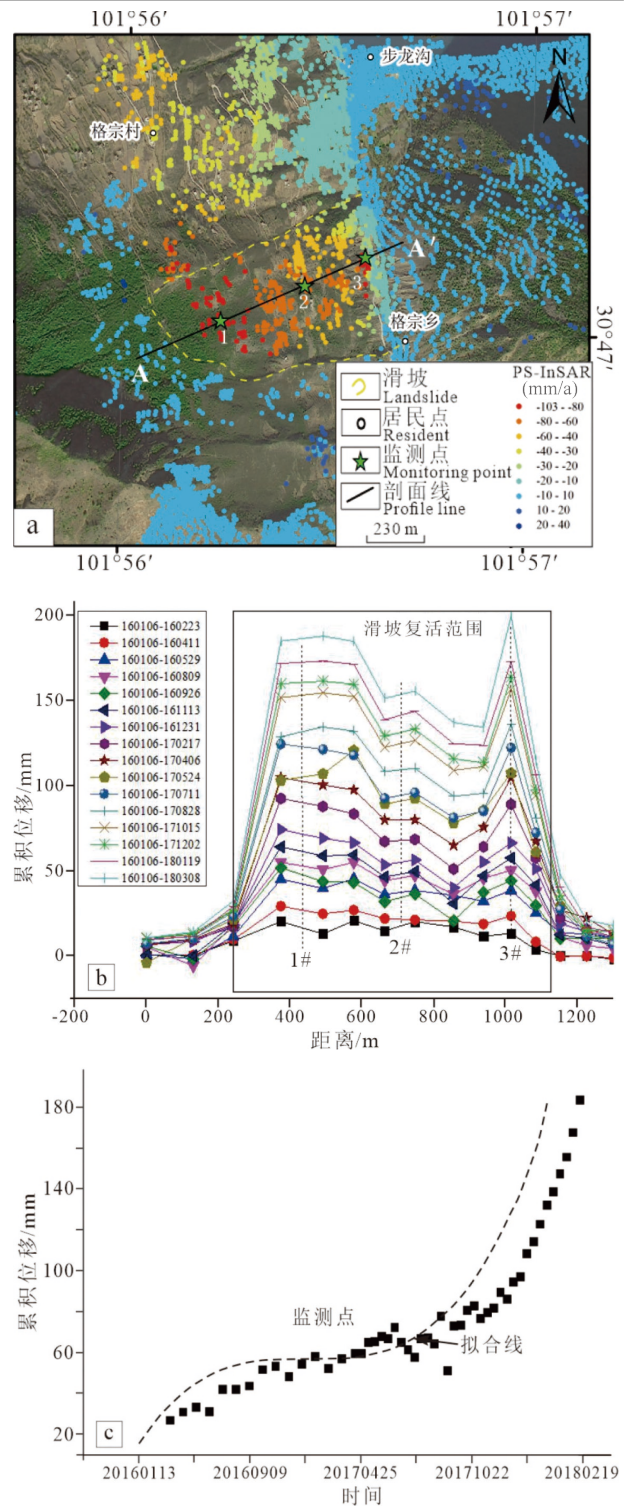


图 2 基于 InSAR 技术的滑坡监测曲线(据张永双等, 2020)
a—滑坡形变速率图; b—沿主滑方向剖面的监测曲线; c—关键点监测曲线

Fig.2 Landslide monitoring curve based on InSAR technology
(after Zhang Yongshuang et al., 2020)

a-Landslide deformation rate map; b-Profile monitoring curve along the main slide direction; c-Key point monitoring curve

所有情况。为充分发挥两种技术的优势,不少学者尝试将两种技术进行拆分重组,形成了永久目标分析干涉测量(IPTA-InSAR)技术,取得了良好的应用效果(Dehghani, 2016; 姚鑫等, 2017)。此外,具有多维度、密集监测功能的 InSAR 的技术近年来也有广泛应用,例如 Hu et al.(2013)提出了通过升降轨 SAR 数据进行滑坡三维时序监测的 InSAR 技术; Samsonov et al.(2020)提出了 MSBAS-3D 方法,能够提取滑坡三维形变的时间序列; Liu et al.(2022b)运用 DS-InSAR 技术对金沙江上游沃达滑坡进行了监测,相比于 PS-InSAR 技术监测点的密度增加了 20% 以上,显著提升了滑坡监测的准确性与可靠性。

4.2 基于 InSAR 技术的滑坡预警模型

滑坡监测的最终目的是为了实实现精准预警(Casagli et al., 2023)。国际上常见的预警方法是“阈值法”和“预警模型法”。日本学者 Saito(1969)提出了基于滑坡开始出现变形到最终滑动失稳所经历的初始变形、等速变形、加速变形 3 个阶段进行判识和预警的“斋藤模型”;李天斌和陈明东(1996)提出了通过 Verhulst 模型的反函数拟合边坡变形特征的预警模型并建立了滑坡时间的预警判据;许强等(2009)提出利用改进的切线角,将斋藤模型中斜坡加速变形阶段进一步为 3 个亚阶段的定量划分标准和滑坡临滑预警判据;亓星等(2020)提出了改进的基于斋藤模型的滑坡临滑时间预报方法;Segalini et al.(2018)提出了创建滑坡数据库校准逆速度模型进行滑坡预警的方法。这些预警模型和方法应用于滑坡监测预警,取得了良好效果。

利用 InSAR 技术进行监测预警的关键是滑坡失稳的形变阈值的确定问题。不少研究者基于时序 InSAR 的监测数据,探讨了滑坡失稳的判识标准,提出了不同的失稳阈值。例如,赵超英等(2019)在研究黑方台地区黄土滑坡时,将变形速率 2 cm/a 和-1 cm/a 作为滑坡判识的形变阈值;刘晓杰(2022)运用 InSAR 识别金沙江流域滑坡时,将 10 mm/a 作为变形速率阈值;Herrera et al.(2013)将 L 波段 ± 21 mm/a、C 波段 ± 14 mm/a 和 X 波段 ± 16 mm/a 作为阈值。Wasowski and Bovenga(2014)认为,判断斜坡稳定与否的阈值取决于失稳斜坡的地貌、岩性、失稳机制等因素;张永双等(2020)认为,滑坡在各演化阶段间一般存在较为明显的拐点。因此滑坡变形

由初始拉裂到均匀、由匀速到加速的拐点可作为 InSAR 技术判断滑坡不同演化阶段的标志。

当前受限于卫星重访周期的限制,采用 InSAR 技术还无法达到与地面监测设备相似频率的地表形变探测,基于 InSAR 技术的监测预警方法仍处于探索阶段。近年来,以中国研制的陆探 1 号为代表的高重访卫星陆续升空,运用时序 InSAR 监测数据与 GNSS、光学遥感影像偏移技术等多源监测数据结合的预警模型已经取得了初步的成效(李军, 2022; 刘斌等, 2024)。

5 面临的挑战与研究展望

无疑,InSAR 技术的应用显著提升了滑坡早期识别与监测预警水平,传统手段的局限性得以有效改善,部分长期困扰滑坡研究的难题取得了实质性的突破。然而,当前 InSAR 技术自身及其在滑坡应用中仍存在一些难点问题或挑战,亟需科学应对。

5.1 InSAR 技术本身面临的主要挑战

5.1.1 复杂地形条件下几何畸变的挑战

SAR 卫星侧视成像特点决定了其在地形起伏较大的高山峡谷地区,会产生叠掩、阴影、透视收缩等几何畸变,形成无效的观测盲区(Wasowski and Bovenga, 2014)。目前通过多源数据数据分析(光学遥感数据、升降轨数据、地面监测数据)或深度学习方式,能够在部分情况下缓解几何畸变带来的影响(李振洪等, 2019; Liu et al., 2023),但多数情况下仍难以取得理想效果。

5.1.2 滑坡大梯度形变探测的挑战

InSAR 技术的适用对象通常为发生缓慢变形的滑坡,一旦滑坡形变梯度超过一定范围便会产生失相干现象,从而造成滑坡探测疏漏。当前在探测大梯度滑坡形变时,常采用 SAR 像素偏移量追踪测量、分频干涉测量(RSSI)及地基 SAR(GB-SAR)等

表 4 多时相 InSAR 技术与地基 SAR 适用范围对比
(Casagli et al., 2023)

Table 4 Comparison of the scope of application of MT-InSAR and GB-SAR (after Casagli et al., 2023)

技术类型	滑坡识别	滑坡监测	滑坡预警
多时相InSAR	ES, RS, SL ^a	ES, RS, SL ^a	ES ^a , RS ^a
地基干涉测量	ES, RS	ES, RS, SL ^a	ES, RS,

注: 土质滑坡(ES: 从每年 1.6 m/yr 到 1.8 m/h)、岩质滑坡(RS: <1.6 m/a 到 >1.8 m/h)、浅层滑坡(SL: <1.6 m/a 到 >1.8 m/h), a 表示应用能力有限。

技术。以 GB-SAR 为例,虽然能够观测到形变梯度相对大的滑坡(表 4),但其观测范围较小、探测效率较低,因而多数情况下仅能针对单体滑坡进行形变探测。

5.1.3 大气延迟的挑战

SAR 卫星雷达发射的电磁波信号在穿过地球大气层时会产生延迟,从而影响 InSAR 的探测精度。部分学者提出了多时相滑动窗口线性模型(MMLM)、通用型卫星雷达大气改正系统 GACOS 等解决方案,在一定程度上缓解了大气延迟的不利影响(李振洪等, 2019; Xiao et al., 2022; Tomás et al., 2023),但由于地球大气环境瞬息万变,存在较大的不确定性,大气延迟在高精度地表形变探测中仍是一项较为严重的干扰因素。

5.1.4 茂盛植被覆盖下穿透性的挑战

在识别较厚植被覆盖的滑坡时,雷达信号会产生后向散射,从而造成失相干现象,部分学者在研究中选择穿透性较强的长波段(L 波段)SAR 数据进行处理(苏晓军等, 2021),但由于长波段雷达信号的形变测量精度较低,在实际应用中仍受到较大制约(刘斌等, 2024)。

5.2 InSAR 技术在滑坡研究中存在的问题

5.2.1 InSAR 广域滑坡监测能力不足

受限于 SAR 影像的空间分辨率、卫星重访周期以及时序 InSAR 数据处理速度的限制,InSAR 监测当前仍以单体滑坡监测为主,广域范围监测能力十分有限。

5.2.2 InSAR 技术应用自动化程度较低

InSAR 技术处理流程自动化程度低主要体现在两方面:一是 InSAR 技术数据处理需要有丰富经验的技术人员参与,部分情况下有较为复杂的流程步骤需要逐步操作实现;二是分析 InSAR 探测结果时通常需要人力目视解译,在广域范围识别时仍有较多需要人力参与的工作量,同时人工进行目视遥感解译时可能存在部分主观性,影响滑坡的识别结果。上述问题在一定程度上限制了 InSAR 技术的普及和推广,同时降低了 InSAR 形变探测的时效性和准确性。

5.2.3 InSAR 数据分析挖掘程度较低

InSAR 技术在应用过程中产生了海量的地表形变数据,但数据背后所反映出来的滑坡相关规律

和机理等并未得到深入的分析挖掘。近年来,随着算力水平的不断提高,以机器学习、深度学习技术为代表的人工智能技术极大提升了对海量数据的挖掘能力,随机森林算法、卷积神经网络(CNN)等与 InSAR 技术结合已经取得了初步成效(Sica et al., 2022; Liu et al., 2022a; Zhang et al., 2023c; Zhao et al., 2024),说明 InSAR 数据具有较大的潜在价值等待挖掘。此外,当前多数研究中 InSAR 数据与滑坡物理力学机制的结合程度较低,对概率统计模型的依赖性较大。

5.3 展望

近年来,随着遥感卫星、互联网、电子信息及人工智能领域技术井喷式的发展,InSAR 技术发展迅猛,在滑坡研究实践中发挥了重要作用,自动化、智能化已成为当前 InSAR 技术发展的主流趋势。针对上述挑战与不足,InSAR 技术未来仍需在以下方面持续突破。

5.3.1 提升海量 SAR 数据的整合能力

随着 SAR 卫星种类数量的不断增加,SAR 数据类型也逐步丰富完善,不同类型的 SAR 数据对应解决的问题也不同,现阶段亟待构建多种类型 SAR 数据整合统一的数据平台,充分发挥多种类型 SAR 数据的优势,提升多源 SAR 数据的使用效率,增强 InSAR 在复杂场景下的适应能力。

5.3.2 推动 InSAR 技术模块化和自动化发展

由于滑坡问题的复杂性,在滑坡识别与监测预警中通常需采用多种 InSAR 技术及 SAR 数据进行处理来达到优势互补的效果(姚鑫等, 2020),但会相应地增加人工任务量。因此,亟需将 InSAR 技术进行模块化封装处理,通过简单指令即可实现不同 InSAR 技术的调用或重组,实现 SAR 数据的自动化处理。目前,StaMPS、MSBAS、EZ-InSAR 等模块化 InSAR 处理工具包已开始应用,随着未来研究的逐步深入,InSAR 技术的应用门槛将进一步降低。

5.3.3 促进 InSAR 技术与互联网技术深度融合

InSAR 技术的广域监测与预警能力的主要制约来自卫星重访周期、数据处理时间长,导致探测到形变数据时效性较差,在未来可借助互联网“云”技术实现 SAR 卫星数据、地面监测数据与地面超级计算机平台数据的实时互联互通,将 SAR 数据实时上传至“云端”服务器,通过超算平台实时运算,

实现全天候、全天时地表形变的动态监测。随着该方向的持续研究,未来或将诞生基于 InSAR 技术的区域多尺度、高精度滑坡实时监测预警系统,当滑坡即将失稳时,预警信息将及时传送至用户人群,实现滑坡预警。

5.3.4 发展人工智能的全新 InSAR 技术

以机器学习、深度学习等为代表的人工智能技术产生了颠覆式的技术革命。未来 InSAR 技术应用需进一步融合人工智能技术,同时结合滑坡物理机制开展研究,构建以物理机制为核心并结合人工智能与 InSAR 技术的滑坡预警模型,此类研究或将突破传统经验模型与统计模型的局限性,助力滑坡预报这一国际重大难题的突破(龚健雅和李彦胜, 2022; 彭建兵和李振洪, 2022)。

6 结 论

本文在简要回顾 InSAR 技术发展历程的基础上,梳理了 InSAR 技术在滑坡识别和监测中应用的研究现状,并展望了未来 InSAR 技术在滑坡灾害研究中的发展方向。主要得到如下认识:

(1) InSAR 技术发展至今已有近半个世纪的历史,其在滑坡领域的应用大致可分为起步阶段、快速发展阶段和成熟阶段。

(2) InSAR 技术克服了传统手段开展滑坡识别与监测预警的局限性,可以实现广域范围、重点区段和单体滑坡的识别,基于 InSAR 技术的滑坡监测预警显著提升了滑坡灾害的防范效果。

(3) 当前 InSAR 技术仍存在亟待突破的挑战,侧视成像的几何畸变、滑坡大梯度形变探测、大气延迟误差及植被穿透等问题仍然制约着 InSAR 技术的应用与发展。同时, InSAR 技术在应用中还存在大范围滑坡监测能力不足、处理流程自动化程度低、数据挖掘程度不够等问题。

(4) InSAR 技术在未来仍有较大的发展潜力,应持续推进 InSAR 技术自动化和智能化,进一步整合海量的 InSAR 数据并与人工智能和超算深度融合,推动 InSAR 技术与物理机制相结合的滑坡预警模型发展,助力滑坡预报难题的突破。

References

Askne J I H, Dammert P B G, Ulander L M H, Smith G. 1997. C-band

- repeat-pass interferometric SAR observations of the forest[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(1): 25–35.
- Aslan G, Fomelis M, Raucoules D, De M M, Bernardie S, Cakir Z. 2020. Landslide mapping and monitoring using persistent scatterer interferometry (PSI) technique in the French Alps[J]. *Remote Sensing*, 12: 1305.
- Bamler R, Eineder M. 2005. Accuracy of differential shift estimation by correlation and split-bandwidth interferometry for wideband and delta-k SAR systems[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2(2): 151–155.
- Bamler R, Hartl P. 1998. Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Inverse Problems*, 14(4): R1–R54.
- Bao M Q, Bruning C, Alpers W. 1997. Simulation of ocean waves imaging by an along-track interferometric synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3): 618–631.
- Berardino P, Fornaro G, Lanari R, Sansosti E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2375–2383.
- Carla T, Intrieri E, Raspini F, Bardi F, Casagli N. 2019. Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR[J]. *Scientific Reports*, 9: 14137.
- Casagli N, Intrieri E, Tofani V, Gigli G, Raspini F. 2023. Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(1): 51–64.
- Dai K R, Li Z H, Xu Q, Burgmann R, Milledge D G, Tomas R, Fan X M, Zhao C Y, Liu X J, Peng J B, Zhang Q, Wang Z, Qu T T, He C Y, Li D R, Liu J N. 2020. Entering the era of earth observation-based landslide warning systems: A novel and exciting framework[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 8(1): 136–153.
- Dehghani M. 2016. Landslide monitoring using hybrid conventional and persistent scatterer interferometry[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 44(4): 505–513.
- Delacourt C, Allemand P, Berthier E, Raucoules D, Casson B, Grandjean P, Pambrun C, Varel E. 2007. Remote-sensing techniques for analysing landslide kinematics: A review[J]. *Bulletin De La Societe Geologique De France*, 178(2): 89–100.
- Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, Prati C, Rocca F, Rucci A. 2011. A new algorithm for processing interferometric Data-Stacks: SqueeSAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9): 3460–3470.
- Ferretti A, Prati C, Rocca F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8–20.
- Galloway D L, Hudnut K W, Ingebritsen S E, Phillips S P, Peltzer G, Rogez F, Rosen P A. 1998. Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California[J]. *Water Resources*

- Research, 34(10): 2573–2585.
- Gao H Y, Gao Y, Li B, Yin Y P, Yang C S, Wan J W, Zhang T T. 2023. The dynamic simulation and potential hazards analysis of the Yigong landslide in Tibet, China[J]. *Remote Sensing*, 15(5): 19.
- Ge Daqing, Wang Yan, Fan Jinghui, Liu Shengwei, Guo Xiaofang, Wang Yi. 2007. A study of surface deformation monitoring using differential SAR interferometry technique and an analysis of its key problems[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, (4): 14–22 (in Chinese with English abstract).
- Gong Jianya, Li Yansheng. 2022. Can quantitative remote sensing and machine learning be integrated?[J]. *Earth Sciences*, 47(10): 3911–3912 (in Chinese).
- Herrera G, Gutiérrez F, García-Davalillo J C, Guerrero J, Notti D, Galve J P, Fernández-Merodo J A, Cooksley G. 2013. Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: The Tena Valley case study (Central Spanish Pyrenees)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 128: 31–43.
- Hilley G E, Bürgmann R, Ferretti A, Novali F, Rocca F. 2004. Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis[J]. *Science*, 304(5679): 1952–1955.
- Hooper A, Zebker H, Segall P, Kampes B. 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers[J]. *Geophysical Research Letters*, 31: L23611.
- Hrysiewicz A, Wang X, Holohan E P. 2023. EZ-InSAR: An easy-to-use open-source toolbox for mapping ground surface deformation using satellite interferometric synthetic aperture radar[J]. *Earth Science Informatics*, 16(2): 1929–1945.
- Hu J, Li Z W, Ding X L, Zhu J J, Sun Q. 2013. Derivation of 3-D coseismic surface displacement fields for the 2011 MS 9.0 Tohoku–Oki earthquake from InSAR and GPS measurements[J]. *Geophysical Journal International*, 192(2): 573–585.
- Huang H B, Ju S J, Duan W, Jiang D J, Gao Z L, Liu H. 2023. Landslide monitoring along the Dadu River in Sichuan based on Sentinel-1 Multi-Temporal InSAR[J]. *Sensors*, 23(7): 16.
- Jung H S, Won J S, Kim S W. 2009. An improvement of the performance of Multiple-Aperture SAR interferometry (MAI)[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(8): 2859–2869.
- Klees R, Massonnet D. 1998. Deformation measurements using SAR interferometry: Potential and limitations[J]. *Geologie En Mijnbouw*, 77: 161–176.
- Li Deren, Zhou Yueqing, Ma Hongchao. 2000. Principles and applications of interferometry SAR[J]. *Developments in Surveying and Mapping*, 25(1): 9–12 (in Chinese with English abstract).
- Li Jun. 2022. Design and Implementation of Visualization and Monitoring and Early Warning Platform Integrating Multi-source Deformation Data[D]. Changsha: Central South University, 1–75 (in Chinese with English abstract).
- Li Menghua, Zhang Lu, Dong Jie, Cai Jiehua, Liao Mingsheng. 2021. Detection and monitoring of potential landslides along Minjiang River valley in Maoxian County, Sichuan using radar remote sensing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 46(10): 1529–1537 (in Chinese with English abstract).
- Li Tianbin, Chen Mingdong. 1996. Time prediction of landslide using Verhulst inverse– function model[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 7(3): 13–17, 29 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoen, Zhou Liang, Su Fenzhen, Wu Wenzhou. 2021. Application of InSAR technology in landslide hazard: Progress and prospects[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(2): 614–629 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhenhong, Song Chuang, Yu Chen, Xiao Ruya, Chen Lifu, Luo Hui, Dai Keren, Ge Daqing, Ding Yi, Zhang Yuxing, Zhang Qin. 2019. Application of satellite radar remote sensing to landslide detection and monitoring: Challenges and solutions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7): 967–979 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhenhong, Zhu Wu, Yu Chen, Zhang Qin, Zhang Chenglong, Liu Zhenjiang, Zhang Xuesong, Chen Bo, Du Jiantao, Song Chuang, Han Bingquan, Zhou Jiawei. 2022. Interferometric synthetic aperture radar for deformation mapping: Opportunities, challenges and the outlook[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(7): 1485–1519 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhenhong, Zhu Wu, Yu Chen, Zhang Qin, Yang Yuanxi. 2023. Development status and trends of imaging geodesy[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 52(11): 1805–1834 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bin, Ge Daqing, Wang Shanshan, Li Man, Zhang Ling, Wang Yan, Wu Qiong. 2020. Combining application of TOPS and ScanSAR InSAR in large-scale geohazards identification[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 45(11): 1756–1762 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bin, Zhang Li, Ge Daqing, Li Man, Zhou Xiaolong, Guo Zhaocheng, Shi Pengqing, Zhang Ling, Jin Dingjian, Wan Xiangxing, Wang Yu, Wang Yan. 2024. Application of InSAR monitoring large deformation of landslides using Lutan-1 constellation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 49(10): 1753–1762 (in Chinese with English abstract).
- Liu Guoxiang, Chen Qiang, Luo Xiaojun, Cai Guolin. 2019. InSAR Principles and Applications[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Liu W C, Zhang Y, Liang Y W, Sun P P, Li Y X, Su X J, Wang A J, Meng X M. 2022a. Landslide risk assessment using a combined approach based on InSAR and random forest[J]. *Remote Sensing*, 14: 2131.
- Liu Xiaojie. 2022. Research on Key Technologies for Early Identification, Monitoring and Forecasting of Wide-area Landslides with Spaceborne Radar Remote Sensing[D]. Xi'an: Chang'an University, 1–264 (in Chinese with English abstract).

- Liu Xiaoyi, Zhang Yongshuang, Guo Changbao, Wu Rui'an Ren Sanshao, Shen Yanqi. 2019. Development characteristics and evolution process of the Garazong ancient rockslide along the Xianshuihe River in western Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(7): 1767–1777 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xinghong, Yao Xin, Yu Kaibing, Dai Fuchu, Wang Shifeng, Yao Jiaming. 2020. Remote sensing integrated identification of geological hazards in the Batang—Mangkang section of the Sichuan—Tibet Highway[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 52(6): 49–60 (in Chinese with English abstract).
- Liu X J, Zhao C Y, Zhang Q, Lu Z, Li Z H. 2020. Deformation of the Baige landslide, Tibet, China, revealed through the integration of Cross-Platform ALOS/PALSAR-1 and ALOS/PALSAR-2 SAR observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 47: 2019GL086142.
- Liu X Y, Zhang Y S, Ren S S, Tong L Q, Guo Z C. 2023. A comprehensive remote sensing identification model for ancient landslides in the Dadu river basin on the eastern margin of Tibet plateau[J]. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1268826.
- Liu Y F, Yang H L, Wang S Z, Xu L L, Peng J H. 2022b. Monitoring and stability analysis of the deformation in the Woda landslide area in Tibet, China by the DS-InSAR method[J]. *Remote Sensing*, 14: 532.
- Mattar K E, Vachon P W, Geudtner D, Gray A L, Cumming I G, Brugman M. 1998. Validation of Alpine glacier velocity measurements using ERS tandem-mission SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3): 974–984.
- Metternicht G, Hurni L, Gogu R. 2005. Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments[J]. *Remote Sensing of Environment*, 98(2/3): 284–303.
- Moreira A, Prats-Iraola P, Younis M, Krieger G, Hajnsek I, Papathanassiou K P. 2013. A tutorial on synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1(1): 6–43.
- Peng Jianbing, Li Zhenhong. 2022. Can geologic big data help in geohazard forecasting?[J]. *Earth Science*, 47(10): 3900–3901 (in Chinese).
- Price E J, Sandwell D T. 1998. Small-scale deformations associated with the 1992 Landers, California, earthquake mapped by synthetic aperture radar interferometry phase gradients[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B11): 27001–27016.
- Qi Xing, Zhu Xing, Xu Qiang, Zhao Kuanyao, Huo Dongdong, Wang Hao, Xiu Dehao. 2020. Improvement and application of landslide proximity time prediction method based on Saito model[J]. *Journal of Engineering Geology*, 28(4): 832–839 (in Chinese with English abstract).
- Ran Tao, Xu Ruge, Zhou Hongfu, Zhang Jinghua, Chen Hao, Wang Yuke, Sun Jie, Cui Yanzong. 2024. Type, formation mechanism and distribution regularity of landslides in the deeply incised valley area of Yalong River Basin—A case study of Zituoqi—Malangcuo river section[J]. *Geology in China*, 51(2): 511–524 (in Chinese with English abstract).
- Reyes-Carmona C, Barra A, Pedro G J, Monserrat O, Vicente P J, Maria M R, Notti D, Ruano P, Millares A, Lopez-Vinielles J, Miguel A J. 2020. Sentinel-1 D-InSAR for monitoring active landslides in critical infrastructures: The case of the rules reservoir (Southern Spain)[J]. *Remote Sensing*, 12(5): 809.
- Rodriguez E, Martin J M. 1992. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars[J]. *IEEE Proceedings-F Radar and Signal Processing*, 139(2): 147–159.
- Saito M. 1969. Forecasting time of slope failure by tertiary creep[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Mexico City, (2): 677–683.
- Samsonov S, Dille A, Dewitte O, Kervyn F, d'Oreye N. 2020. Satellite interferometry for mapping surface deformation time series in one, two and three dimensions: A new method illustrated on a slow-moving landslide[J]. *Engineering Geology*, 266: 105471.
- Scheingross J S, Minchew B M, Mackey B H, Simons M, Lamb M P, Hensley S. 2013. Fault-zone controls on the spatial distribution of slow-moving landslides[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 125(3/4): 473–489.
- Segalini A, Valletta A, Carri A. 2018. Landslide time-of-failure forecast and alert threshold assessment: A generalized criterion[J]. *Engineering Geology*, 245: 72–80.
- Shan Y F, Xu Z, Zhou S S, Lu H Y, Yu W L, Li Z G, Cao X, Li P F, Li W L. 2024. Landslide hazard assessment combined with InSAR deformation: A case study in the Zagunao River Basin, Sichuan Province, Southwestern China[J]. *Remote Sensing*, 16: 99.
- Sica F, Calvanese F, Scarpa G, Rizzoli P. 2022. A CNN-based coherence-driven approach for InSAR phase unwrapping[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 4003705.
- Small D, Pasquali P, Holecz F, Meier E, Nuesch D. 1998. Experiences with multiresolution and multifrequency InSAR height model generation[C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 98) on Sensing and Managing the Environment. Seattle. 1998: 2671–2673.
- Su Xiaojun, Zhang Yi, Jia Jun, Liang Yiwen. 2021. InSAR-based monitoring and identification of potential landslides in Lueyang County, the Southern Qinling Mountains, China[J]. *Mountain Research*, 39(1): 59–70 (in Chinese with English abstract).
- Tomás R, Díaz E, Szeibert W T, Liu X, Lopez-Sanchez J M, Zhao C. 2023. Geomorphological characterization, remote sensing monitoring, and modeling of a slow-moving landslide in Alcoy (Southern Spain)[J]. *Landslides*, 20(6): 1293–1301.
- Wang B H, Zhao C Y, Zhang Q, Peng M M. 2019. Sequential InSAR time series deformation monitoring of land subsidence and rebound in Xi'an, China[J]. *Remote Sensing*, 11: 2845.
- Wang W D, Motagh M, Mirzaee S, Tao L, Zhou C, Tang H, Roessner S. 2023. The 21 July 2020 Shaziba landslide in China: Results from multi-source satellite remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 295: 113669.

- Wasowski J, Bovenga F. 2014. Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives[J]. *Engineering Geology*, 174: 103–138.
- Xiao R Y, Chen Y, Li Z H, Jiang M, He X F. 2022. InSAR stacking with atmospheric correction for rapid geohazard detection: Applications to ground subsidence and landslides in China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 115(10): 103082.
- Xu Qiang, Zeng Yuping, Qian Jiangpeng, Wang Chengjun, He Chengjiang. 2009. Study on an improved tangential angle and the corresponding landslide pre-warning criteria[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(4): 501–505 (in Chinese with English abstract).
- Xu Qiang, Dong Xiujun, Li Weile. 2019. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7): 957–966 (in Chinese with English abstract).
- Xu Qiang, Cui Shenghua, Huang Wei, Pei Xiangjun, Fan Xuanmei, Ai Ying, Zhao Weihua, Luo Yonghong, Luo Jing, Liu Ming, Xia Min, Wang Fei, Peng Dalei, Zheng Guang, Chen Wanlin. 2023. Construction of a landslide knowledge graph in the field of engineering geology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 48(10): 1601–1615 (in Chinese with English abstract).
- Yan Yiqiu, Guo Changbao, Zhong Ning, Li Xue, Li Caihong. 2022. Deformation characteristics of Jiayu ancient landslide based on InSAR monitoring method, Sichuan, China[J]. *Earth Science*, 47(12): 4681–4697 (in Chinese with English abstract).
- Yang Chao, Yang Yinghui, Wang Jiyan, Xu Qiang, Chen Qiang, Tao Xinxin, Hu Zhiqing. 2023. Inferring landslide depth based on ascending and descending InSAR deformations—example of Taoping village ancient landslide[J]. *Journal of Engineering Geology*, 31(3): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Yao Xin, Zhang Yongshuang, Li Lingjing, Ling Sheng, Wang Zhongsheng, Zhou Zhenkai. 2017. InSAR-based recognition of slow-moving slope disasters along the Xianshuihe active fault in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(8): 1694–1705 (in Chinese with English abstract).
- Yao Xin, Deng Jianhui, Liu Xinghong, Zhou Zhenkai, Yao Jiaming, Dai Fuchu, Ren Kaiyu, Li Lingjing. 2020. Primary recognition of active landslides and development rule analysis for Pan three-river-parallel territory of Tibet Plateau[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 52(5): 16–37 (in Chinese with English abstract).
- Ye Xia, Kaufmann H, Guo X F. 2004. Landslide monitoring in the Three Gorges area using D-InSAR and corner reflectors[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(10): 1167–1172.
- Zhang Benhao, Wei Yunjie, Yang Chengsheng, Xiong Guohua, Dong Jihong. 2022. InSAR identification and monitoring of geological hazards in Ranwu region of Tibet[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 33(1): 18–26 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C L, Li Z H, Ding M T, Zhu W, Chen B, Zhuang J Q, Du J T, Peng J B. 2023a. Dynamic deformation monitoring and scenario simulation of the Xiaomojiu landslide in the Jinsha River Basin, China[J]. *Landslides*, 20: 2343–2358.
- Zhang Y S, Ren S S, Liu X Y, Guo C B, Li J Q, Bi J B, Ran L N. 2023b. Reactivation mechanism of old landslide triggered by coupling of fault creep and water infiltration: A case study from the east Tibetan Plateau[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82: 291.
- Zhang Y, Li Y X, Meng X M, Liu W C, Wang A J, Liang Y W, Su X J, Zeng R Q, Chen X. 2023c. Automatic mapping of potential landslides using satellite multitemporal interferometry[J]. *Remote Sensing*, 15(20): 29.
- Zhang Yongshuang, Liu Xiaoyi, Yao Xin. 2020. InSAR-based method for early recognition of ancient landslide reactivation in Dadu River, China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 51(5): 545–555 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongshuang, Liu Xiaoyi, Wu Rui'an, Guo Changbao, Ren Shanshao. 2021. Cognization, characteristics, age and evolution of the ancient landslides along the deep-cut valleys on the eastern Tibetan Plateau, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 28(2): 94–105 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Chaoying, Liu Xiaojie, Zhang Qin, Peng Jianbing, Xu Qiang. 2019. Research on loess landslide identification, monitoring and failure mode with InSAR technique in Heifangtai, Gansu[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7): 996–1007 (in Chinese with English abstract).
- Zhao F M, Meng X M, Zhang Y, Chen G, Su X J, Yue D X. 2019. Landslide susceptibility mapping of Karakorum highway combined with the application of SBAS-InSAR technology[J]. *Sensors*, 19(12): 18.
- Zhao G H, Lan H X, Yin H Y, Li L P, Alexander S, Sun W F, Tian C Y. 2024. Deformation, structure and potential hazard of a landslide based on InSAR in Banbar county, Xizang (Tibet)[J]. *China Geology*, 7(2): 203–221.
- Zhu Tongtong, Shi Xuguo, Zhou Chao, Jiang Houjun, Zhang Lu, Liao Mingsheng. 2021. Stability monitoring and analysis of the Shuping landslide in the Three Gorges area with Sentinel-1 I images from 2016 to 2020[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 46(10): 1560–1568 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 葛大庆, 王艳, 范景辉, 刘圣伟, 郭小方, 王毅. 2007. 地表形变 D-InSAR 监测方法及关键问题分析[J]. *国土资源遥感*, (4): 14–22.
- 龚健雅, 李彦胜. 2022. 定量遥感与机器学习能够融合吗?[J]. *地球科学*, 47(10): 3911–3912.

- 李德仁, 周月琴, 马洪超. 2000. 卫星雷达干涉测量原理与应用[J]. 测绘科学, 25(1): 9-12, 1.
- 李军. 2022. 融合多源变形数据的可视化与监测预警平台设计与实现[D]. 长沙: 中南大学, 1-75.
- 李梦华, 张路, 董杰, 蔡杰华, 廖明生. 2021. 四川茂县岷江河谷区段滑坡隐患雷达遥感识别与形变监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 46(10): 1529-1537.
- 李天斌, 陈明东. 1996. 滑坡时间预报的费尔哈斯反函数模型法[J]. 地质灾害与环境保护, 7(3): 13-17, 29.
- 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[J]. 遥感学报, 25(2): 614-629.
- 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[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 44(7): 967-979.
- 李振洪, 朱武, 余琛, 张勤, 张成龙, 刘振江, 张雪松, 陈博, 杜建涛, 宋闯, 韩炳权, 周佳薇. 2022. 雷达影像地表形变干涉测量的机遇、挑战与展望[J]. 测绘学报, 51(7): 1485-1519.
- 李振洪, 朱武, 余琛, 张勤, 杨元喜. 2023. 影像大地测量学发展现状与趋势[J]. 测绘学报, 52(11): 1805-1834.
- 刘斌, 葛大庆, 王珊珊, 李曼, 张玲, 王艳, 吴琼. 2020. TOPS 和 ScanSAR 模式 InSAR 在广域地质灾害识别中的联合应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 45(11): 1756-1762.
- 刘斌, 张丽, 葛大庆, 李曼, 周小龙, 郭兆成, 石鹏卿, 张玲, 金鼎坚, 万祥星, 王宇, 王艳. 2024. 陆地探测一号卫星滑坡大变形 InSAR 监测应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 49(10): 1753-1762.
- 刘国祥, 陈强, 罗小军, 蔡国林. 2019. InSAR 原理与应用[M]. 北京: 科学出版社.
- 刘晓杰. 2022. 星载雷达遥感广域滑坡早期识别与监测预测关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 1-264.
- 刘筱怡, 张永双, 郭长宝, 吴瑞安, 任三绍, 沈亚麒. 2019. 川西鲜水河呷拉宗古滑坡发育特征与形成演化过程[J]. 地质学报, 93(7): 1767-1777.
- 刘星洪, 姚鑫, 於开炳, 戴福初, 王世锋, 姚佳明. 2020. 川藏高速巴塘—芒康段地质灾害遥感综合早期识别研究[J]. 工程科学与技术, 52(6): 49-60.
- 彭建兵, 李振洪. 2022. 地学大数据可否助力地质灾害预报?[J]. 地球科学, 47(10): 3900-3901.
- 亓星, 朱星, 许强, 赵宽耀, 霍冬冬, 王浩, 修德皓. 2020. 基于斋藤模型的滑坡临滑时间预报方法改进及应用[J]. 工程地质学报, 28(4): 832-839.
- 冉涛, 徐如阁, 周洪福, 张景华, 陈浩, 王羽珂, 孙洁, 崔炎宗. 2024. 雅砻江流域深切河谷区滑坡类型、成因及分布规律——以子拖西—麻郎错河段为例[J]. 中国地质, 51(2): 511-524.
- 苏晓军, 张毅, 贾俊, 梁懿文, 李媛茜, 孟兴民. 2021. 基于 InSAR 技术的秦岭南部略阳县潜在滑坡灾害识别研究[J]. 山地学报, 39(1): 59-70.
- 许强, 曾裕平, 钱江澎, 王承俊, 何成江. 2009. 一种改进的切线角及对应的滑坡预警判据[J]. 地质通报, 28(4): 501-505.
- 许强, 董秀军, 李为乐. 2019. 基于天—空—地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 44(7): 957-966.
- 许强, 崔圣华, 黄维, 裴向军, 范宣梅, 艾瑛, 赵伟华, 罗永红, 罗璟, 刘明, 夏敏, 王飞, 彭大雷, 郑光, 陈婉琳. 2023. 面向工程地质领域的滑坡知识图谱构建方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 48(10): 1601-1615.
- 闫怡秋, 郭长宝, 钟宁, 李雪, 李彩虹. 2022. 基于 InSAR 形变监测的四川甲居古滑坡变形特征[J]. 地球科学, 47(12): 4681-4697.
- 杨超, 杨莹辉, 王继燕, 许强, 陈强, 陶鑫鑫, 胡植庆. 2023. 利用 InSAR 升降轨形变数据反演滑坡深度——以桃坪乡古滑坡为例[J]. 工程地质学报, 31(3): 868-879.
- 姚鑫, 张永双, 李凌婧, 凌盛, 王宗盛, 周振凯. 2017. 青藏高原鲜水河活动断裂带蠕变斜坡地质灾害 InSAR 识别研究[J]. 地质学报, 91(8): 1694-1705.
- 姚鑫, 邓建辉, 刘星洪, 周振凯, 姚佳明, 戴福初, 任开瑀, 李凌婧. 2020. 青藏高原泛三江并流区活动性滑坡 InSAR 初步识别与发育规律分析[J]. 工程科学与技术, 52(5): 16-37.
- 张本浩, 魏云杰, 杨成生, 熊国华, 董继红. 2022. 西藏然乌地区地质灾害隐患点 InSAR 识别与监测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 33(1): 18-26.
- 张永双, 刘筱怡, 姚鑫. 2020. 基于 InSAR 技术的古滑坡复活早期识别方法研究——以大渡河流域为例[J]. 水利学报, 51(5): 545-555.
- 张永双, 刘筱怡, 吴瑞安, 郭长宝, 任三绍. 2021. 青藏高原东缘深切河谷区古滑坡: 判识、特征、时代与演化[J]. 地学前缘, 28(2): 94-105.
- 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[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 44(7): 996-1007.
- 朱同同, 史绪国, 周超, 蒋厚军, 张路, 廖明生. 2021. 利用 2016—2020 年 Sentinel-1 数据监测与分析三峡库区树坪滑坡稳定性[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 46(10): 1560-1568.