引文格式:戴可人,许强,邓晋,等.滑坡隐患InSAR广域识别研究综述[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(8):1469-1482.DOI:10.13203/j.whugis20250204

Citation:DAI Keren,XU Qiang,DENG Jin,et al.Review on Large-Scale Identification of Potential Landslides with InSAR[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(8):1469-1482.DOI:10.13203/j.whugis20250204

滑坡隐患InSAR广域识别研究综述

戴可人[1,2,3] 许 强[1] 邓 晋[1,2] 卓冠晨[1,2] 陈有东[1,2]
韩亚坤[2] 李振洪[4,5]

1 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室,四川 成都,610059
2 成都理工大学地球与行星科学学院,四川 成都,610059
3 国网西南电力研究院,四川 成都,610095
4 长安大学测绘与地质工程学院,陕西 西安,710054
5 黄土科学全国重点实验室,陕西 西安,710054

摘 要:滑坡是全球范围内发生频率最高、分布范围最广、危害程度最大的自然灾害之一,严重威胁人们的生命和财产安全及重大工程设施安全。近年来,合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)技术凭借其覆盖范围广、时空分辨率高、具备云雾穿透能力及非接触测量等显著优势,已成为基于斜坡变形探测实现滑坡隐患识别的关键技术手段,受到全球普遍关注并得到广泛应用。系统梳理了中国滑坡隐患InSAR广域识别的发展历程与背景;从发展时段与发文量视角,系统总结了InSAR技术在国内外的研究进展与应用现状,揭示了该技术在全球范围内,特别是在中国近5年来的迅猛发展态势,发现当前研究重心已从技术突破转向广域应用,并对该技术未来发展趋势及现存技术挑战进行了总结与展望。该研究旨在深化对InSAR广域识别滑坡隐患发展脉络与关键问题的理解,为该领域未来的研究与应用提供参考。

关键词:InSAR;滑坡隐患识别;研究现状;发展历史;技术挑战

中图分类号:P273 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-07-10

DOI:10.13203/j.whugis20250204 **文章编号**:1671-8860(2025)08-1469-14

Review on Large-Scale Identification of Potential Landslides with InSAR

DAI Keren[1,2,3] *XU Qiang*[1] *DENG Jin*[1,2] *ZHUO Guanchen*[1,2] *CHEN Youdong*[1,2]
HAN Yakun[2] *LI Zhenhong*[4,5]

1 State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2 College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
3 State Grid Southwest Electric Power Research Institute, Chengdu 610095, China
4 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China
5 Key Laboratory of Loess, Xi'an 710054, China

Abstract: Landslides are among the most frequent, widespread, and destructive natural disasters globally, posing severe threats to human life, property, and critical infrastructure. In recent years, interferometric synthetic aperture radar (InSAR) has emerged as a key technique for identifying potential landslides by monitoring slope deformation, due to its wide spatial coverage, high spatiotemporal resolution, all-weather capability and non-contact measurement. Thus, the technique has attracted widespread global attention and has seen extensive application. First, this paper systematically reviews the development history and background of large-scale landslide identification using InSAR technology in China. Then, based on analysis of development phases and publication trends, it provides a comprehensive summary of the research progress and application status of InSAR both domestically and internationally. The rapid advancement of this technology on a global scale—

基金项目:四川省自然科学基金杰出青年科学基金(2023NSFSC1909);中国博士后基金面上项目(2020M673322)。

第一作者:戴可人,博士,教授,主要从事地质灾害影像大地测量研究。daikeren17@cdut.edu.cn

通信作者:许强,博士,教授。xq@cdut.edu.cn

particularly in China over the past five years—is highlighted, alongside the observation that the current research focus has shifted from technological breakthroughs to large-scale applications. Finally, the paper concludes with a summary and outlook on future development trends and existing technical challenges of the technology.This study aims to deepen understanding of the development and key challenges of large-scale landslide identification via InSAR, and to offer insights for future research and applications.

Key words: InSAR; potential landslide identification; research progress; development history; technical challenge

滑坡是指边坡上的岩土体在自然或人为因素的影响下失去稳定,沿贯通的破坏面整体下滑的现象[1-2]。中国山地丘陵区约占国土面积的65%,地质条件复杂,构造活动频繁,是世界上地质灾害最严重、受威胁人口最多的国家之一[3]。滑坡、泥石流等突发性地质灾害点多面广、防范难度大。近年来,发生了多起重大的滑坡灾害,例如,2017年,茂县新磨滑坡造成10人死亡,73人失踪[4-5];2018年,白格滑坡堵塞金沙江,形成堰塞湖[6-7],下泄的洪水在四川、云南境内造成了严重的洪涝灾害;2022年,贵州毕节市田湾子滑坡造成14人遇难,3人受伤[8-9]。根据国家统计局数据,2021—2023年全国共发生地质灾害14 099起,其中滑坡灾害占比50.9%,造成的直接经济损失超过50亿元,造成200多人伤亡[10]。上述滑坡灾害不仅造成了巨大经济损失,而且对人民群众的生命安全造成了极大威胁。

2015年5月,习近平总书记在十八届中共中央政治局第二十三次集体学习时指出:“要努力实现从注重灾后救助向注重灾前预防转变”;2019年,自然资源部也提出防范地质灾害的核心需求是要搞清楚“隐患点在哪里”“什么时候可能发生”;2022年12月,自然资源部发布的《全国地质灾害防治“十四五”规划》明确提出:“健全完善以地质灾害风险防控为主线的综合防治体系,提升地质灾害防治能力和防御工程标准,最大限度防范和化解地质灾害风险。”上述重要指示多次提及提升防灾能力与灾害隐患识别,准确找出滑坡隐患位置并对重点区域开展全面监测预警,是实现滑坡灾害防灾减灾的重要步骤。

滑坡隐患是指已具有明显变形迹象并在近期内可能成灾的斜坡[11],其特点包括隐蔽性、复杂性、突发性、时空不确定性和动态变化性强等。传统调查手段在滑坡隐患排查中很难达到广域覆盖,因此利用遥感技术开展广域“普查”[3, 12-13]进行滑坡隐患的早期识别是目前滑坡灾害防治的重要步骤。光学遥感解译是滑坡隐患大范围早期识别的主要手段之一,但其在滑坡多发区尤其是中国的西南山区受云雾影响较大,导致光学影像质量较差,且局限于地貌的定性解译[14-15]。

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)干涉测量(interferometric SAR, InSAR)技术作为近30年的新兴雷达遥感技术,具有全天候、全天时、覆盖范围广、空间分辨率高、非接触、综合成本低等优点,特别是InSAR具有的大范围连续跟踪微小形变的特性[16-20],使其能够对广域正在发生变形的斜坡体具有独特的识别能力[21-23],近年来被广泛应用于大范围的滑坡等地质灾害隐患识别与监测[13, 24-30],已在交通、水力、电力等各行各业中被纳入工程应用尝试。基于星载InSAR进行广域斜坡体形变探测从而实现广域滑坡隐患识别,在近年来得到飞速发展并已逐步成为了常规手段。

本文首先对中国滑坡隐患InSAR广域识别的发展脉络与背景进行了梳理,并基于文献计量视角(发展时段与发文量)对比分析了该技术在国内外的研究进展与应用现状,然后对该领域的未来发展趋势及面临的核心技术挑战进行了总结与展望,以期为InSAR技术更深入、高效地服务于国家地质灾害早期识别与风险防控提供参考。

1 中国滑坡隐患InSAR广域识别发展历史与背景

面对严峻复杂的地质灾害防治形势,中国自20世纪90年代起逐步建立了较为完善的群测群防体系[3];“十二五”期间,国土资源部建立了由群测群防员实施的雨前排查、雨中巡查和雨后复查的群测群防“三查”工作制度,全国有29万余名群测群防员,实现了地质灾害隐患点全覆盖;“十三五”时期,国土资源部致力于促进群测群防向群专结合转变,健全完善全国地灾专业监测网络,针对威胁城镇、重大工程所在区域、交通干线及其他重要设施的3 000处地灾隐患,布设专业监测仪器进行实时监测[31]。已发现全国共有地质灾害隐患点近30万处,威胁着约2 000万人的生

命安全和4 500亿元的财产安全[3]。

据统计,中国近年来发生的导致灾难性后果的地质灾害70%以上都不在已知的地质灾害隐患点库内[2-3]。其中影响较大的是两次标志性事件:2017年6月24日,四川省阿坝州茂县叠溪镇新磨村突发山体高位垮塌[4, 32],整个新磨村被掩埋,造成超过80人遇难或失踪;2018年10月11日和11月3日,在西藏自治区江达县波罗乡白格村与四川省白玉县绒盖乡则巴村交界处金沙江西藏岸(右岸)先后两次发生大规模高位滑坡,堵塞金沙江形成堰塞湖[6, 33-34]。堰塞体经过人工干预被完全冲开,但下泄的洪水在下游四川、云南境内仍造成严重的洪涝灾害。这两次大事件均位于国家滑坡隐患点库之外,发生前没有提前监测措施或预警,造成了较为严重的危害与社会影响[4, 6, 13],也让业内各界认识到仅靠传统的调查排查和群测群防手段很难对高位、高隐蔽性的滑坡隐患进行早期识别与监测预警。因此,必须借助现代对地观测技术,尽可能全面地从广域尺度上探测和发现隐患点,明确滑坡可能在哪里发生这个先行问题,从而才有可能实现监测预警及防灾减灾。

2018年10月10日,习近平总书记在中央财经委员会第三次会议上明确指出:“要建立高效科学的自然灾害防治体系,提高全社会自然灾害防治能力。”并提出推动建设“九项重点工程”,其中包括实施灾害风险调查和重点隐患排查工程,掌握风险隐患底数。同年,原自然资源部部长陆昊提出地质灾害防治的“四步”工作方案,即研究原理、发现隐患、监测隐患、发布预警,同时强调,当前防范地质灾害的核心需求是要搞清楚“隐患点在哪里”“什么时候可能发生”。学术界针对重大地质灾害隐患早期识别的新理论、新技术、新方法分别于2018年11月在贵阳和2019年5月在成都召开了“重大地质灾害隐患早期识别与监测预警专题研讨会”,研讨地质灾害隐患早期识别的“三查”体系等当前重大地质灾害防治的核心问题,共同推动相关领域的科技进步和成果推广应用。2019年,自然资源部中国地质调查局自然资源航空物探遥感中心、地质环境监测院主办地质灾害隐患遥感智能识别研讨会,旨在研究解决“地质灾害隐患在哪里”的问题,推进地质云平台、智能化和大数据“三位一体”建设[35];2020年,中华人民共和国自然资源部地质勘察管理司牵头面向全国选取四川强震区等5个地质灾害高易发区为示范区,开展地质灾害隐患综合遥感识别与调查工作;2021年,四川省自然资源厅牵头开展四川面积约48.6万km^2的地质灾害隐患遥感识别监测工作。与此同时,各省各地也陆续成立了省级地质灾害隐患识别中心,以期常态化开展地质灾害隐患InSAR广域识别工作,凸显了国家及各省市对地质灾害隐患广域识别的重视。

近年来,随着《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》《“十四五”国家综合防灾减灾规划》《全国地质灾害防治“十四五”规划》等文件的出台,国家倡导“统筹发展和安全,建设更高水平的平安中国”、“开展灾害事故风险隐患排查治理,实施公共基础设施安全加固和自然灾害防治能力提升工程”。近年来,众多高校、科研院所与企业单位陆续发布了覆盖全国的InSAR变形一张图产品[36-38]。2023年5月于成都理工大学召开了基于InSAR的广域形变监测专题研讨会,显示出随着卫星数据积累,目前InSAR技术在广域高效计算、自动识别算法等方面取得突破和阶段性成果,未来将会侧重于获取更准确、更高频的InSAR结果、开展更智能、更精准的解译发展,推动滑坡隐患InSAR广域识别的全面工程化应用。

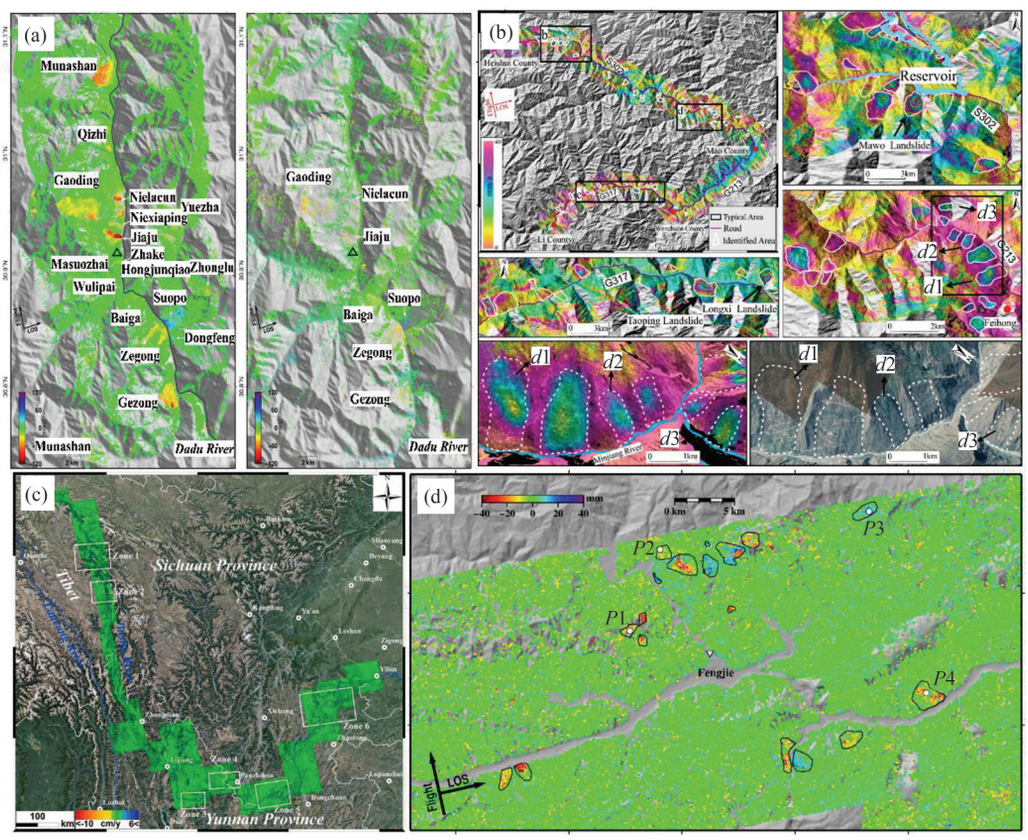
2　滑坡隐患InSAR广域识别国内外研究现状

2.1　国内研究现状

InSAR技术在国内滑坡领域的首次应用可以追溯到2002—2004年XIA等[39]和YE等[40]在三峡水库区域开展的相关InSAR测量实验。随后在三峡库区的InSAR滑坡监测研究逐渐增多[28, 41-43],如2008—2010年,WANG等[44-45]采用多种InSAR技术测量了三峡大坝周围地区如巴东县的形变;2013年,LIU等[46]也成功识别到巴东县的斜坡形变区域;2016年SHI等[28]基于先进陆地观测卫星(advanced land observing satellite, ALOS)相控阵型L波段SAR数据在三峡库区共计探测到30处不稳定斜坡(图1(d)),三峡库区成为了滑坡灾害InSAR早期识别研究与应用最早的典型区域。

西南山区地形复杂、山高坡陡且地震频发,系地质灾害高发区域,亦是InSAR滑坡监测需求广泛且应用较早的区域。2010年,YIN等[47]综合采用GPS与InSAR技术对四川甲居滑坡实施监测,有效验证了该技术的优势。2014—2016年间,CHEN等[48]与DAI等[49]基于SAR数据实施巨型单体滑坡——大光包滑坡的形变监测。此后数年,随着欧洲空间局

Sentinel-1数据的广泛获取,该技术在四川逐步由单体InSAR监测扩展至区域InSAR滑坡隐患识别,公路沿线[50](图1(b))、丹巴地区[51](图1(a))、大渡河流域[51-55]及金沙江流域[15,55-57](图1(c))均成为研究热点。此外,研究重点区域还包括藏东南地区川藏高速公路与交通廊道[58]等重大基础设施沿线,以及滇西北雅砻江流域[14,59-62]、怒江流域[63]等滑坡灾害集中发育区域,InSAR技术为灾害监测识别提供了重要技术支撑,取得显著研究成果[64],促使该技术在地质灾害领域获得广泛关注与认可。



(a) 丹巴地区[51];(b) 川西某国道附近[50];(c) 金沙江流域识别结果[56];(d) 三峡区域识别结果[28]

图1 大范围InSAR技术识别结果

Fig. 1 Results of Large-Scale Landslides Identification Using InSAR

InSAR技术工程化应用日益广泛,且伴随卫星遥感数据质量提升与计算能力进步,滑坡隐患识别的空间尺度持续扩展。2019年,在自然资源部统一部署下,全国地质灾害高易发区9省市采用以InSAR技术为核心的综合遥感手段,实施业务化大范围滑坡隐患普查,覆盖黄河上游、四川强震区、藏东南、滇西北及三峡库区五大典型灾害分布区(图2),总面积达118万km^2。历经4个月作业,全国高、中易发区内221个县区共识别出8 450处疑似隐患[65]。同期,重大地质灾害隐患综合遥感识别与监测技术向全国14个灾害影响突出省份推广,成为新一轮地质灾害风险普查的核心技术支撑[66]。

基于中国知网(http://www.cnki.net/)以“滑坡识别+InSAR”为关键词检索,共获得相关论文约200篇(图3)。数据显示,2008—2017年间累计发文量仅为6篇;2017年四川茂县新磨村特大山体滑坡事件[4]中,InSAR技术的灾害回溯分析引发学界广泛关注,2018—2019年总发文量快速增长至近20篇。2020—2024年总发文量激增至169

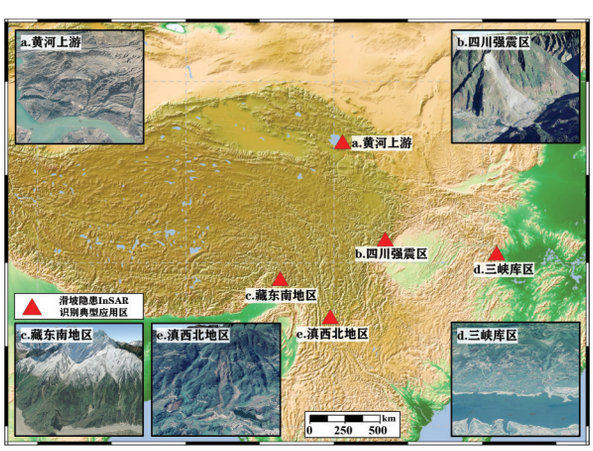
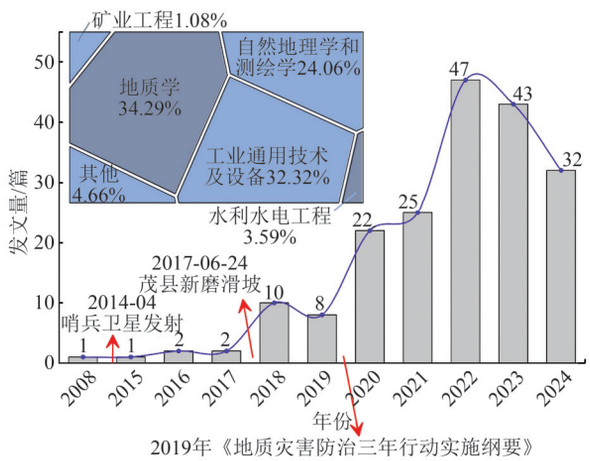


图2 全国典型滑坡隐患InSAR广域识别应用区域

Fig. 2 Typical Regions in China Where InSAR has Been Applied for Large-Scale Identification of Potential Landslide

篇,较 2018—2019 年的年均发文量增幅约 2 倍。此显著增长主要源于 2019 年自然资源部印发《地质灾害防治三年行动实施纲要》,明确提出需充分利用“空-天-地”观测技术实现复杂区大型滑坡隐患早期识别。这表明政府部门业务化需求有力推动了该领域的发展。值得注意的是,2022—2024 年发文量趋于稳定,一定程度反映 InSAR 滑坡广域识别正从研究转向工程化应用。学科分布方面,地质学(34.29%)、工业通用技术及设备(32.32%)与自然地理学和测绘学(24.06%)位列前三(图 3),印证该技术已突破测绘学科范畴,获得地质与工程技术领域的全面重视。



注:数据检索时间为 2025-02-18。

图 3　中国知网数据库国内“滑坡识别+InSAR”检索结果统计

Fig. 3　Statistical Results of Domestic Publications Retrieved from the CNKI Database Using the Keywords “Landslide Identification + InSAR”

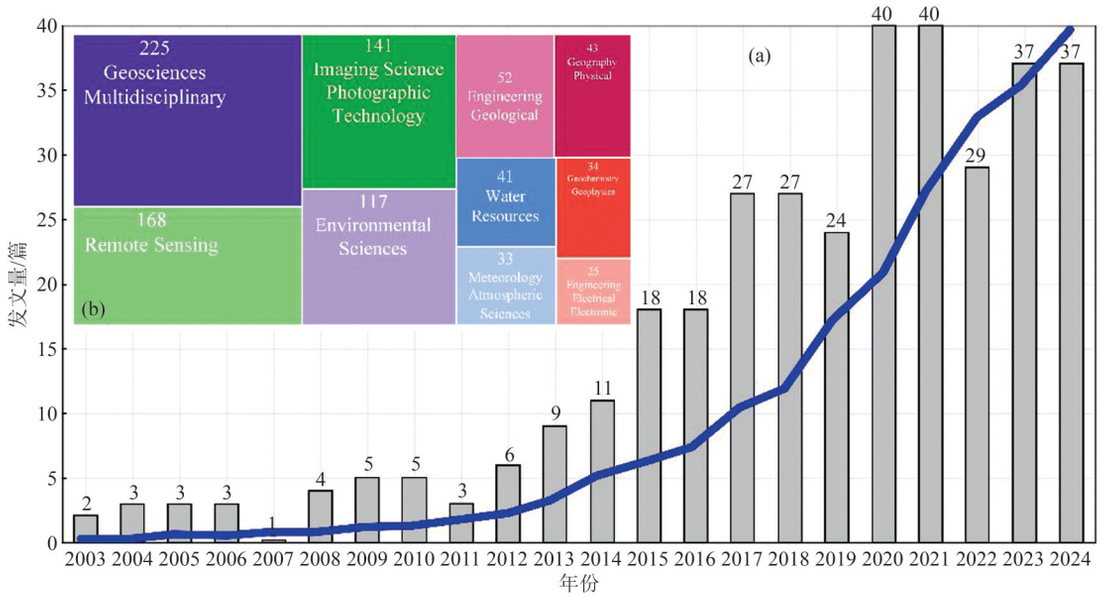
2.2　国外研究现状

基于 Web of Science 数据库检索,国际范围内涉及 InSAR 技术用于滑坡识别的科技论文共计 352 篇。如图 4(a)所示,国际学界利用 InSAR 技术进行滑坡隐患识别的研究活动始于 2004 年前后,此后研究成果数量呈持续增长趋势。由于时序 InSAR 算法的改进与逐步成熟,2011—2014 年间相关论文发表量呈现快速增长。2015—2017 年发文量出现显著增长,这主要源于 Sentinel-1 卫星数据的发射及其开放获取政策,促使国际学者更广泛地将该技术应用于滑坡隐患识别;此增长阶段较中国得益于 Sentinel-1 数据所带来的显著研究增长期(2018—2019 年)提前约 2~3 年。2020—2024 年发文量未呈现显著增长,表明该技术趋于成熟并逐步进入全面应用阶段;这一发展态势较中国同类转变约提前 2 年。在检索文献中,逾 50% 的论文隶属于地球科学及其交叉学科领域,其次为遥感学科、影像科学与摄影技术以及环境科学等(图 4(b)),表明该研究方向主要受到地球科学与遥感领域学者的关注。

基于上述发文量分析及国际上滑坡隐患 InSAR 识别的典型案例与关键事件节点,该领域发展历程可划分为 4 个阶段(图 5):起步阶段、探索阶段、应用阶段与爆发阶段。2004—2008 年间,年均论文发表量维持在 2 篇,标志着国际 InSAR 滑坡识别研究的起步。此阶段的代表性成果包括:随着永久散射体(persistent scatterer,PS)-InSAR 的提出,HILLEY 等[67]首次将该技术应用于滑坡识别领域,成功探测滑坡体并精确界定其空间分布,验证了 InSAR 技术在滑坡隐患识别中的有效性。

随着小基线集(small baseline subset,SBAS)-InSAR 等算法的持续发展,时序 InSAR 技术逐渐从广泛应用的城市地面沉降监测转向植被覆盖区的滑坡研究[67-71],上述研究主要集中于美国、瑞典、意大利等国家。2009—2014 年期间,年均文献发表量约为 6 篇,较前一阶段有所增加,标志着国际 InSAR 滑坡隐患识别进入探索阶段。代表性案例如:LAUKNES 等[72]应用 SBAS-InSAR 与 PS-InSAR 技术同时使用 ERS-1 和 ERS-2 数据,实现了挪威北部(约 50 km^2)潜在滑坡的识别;BOVENGA 等[73]基于 X 波段 COSMO/SkyMed 和 C 波段 ENVISAT 数据对瑞士阿尔卑斯山局部区域(约 30 km^2)开展滑坡识别;BIANCHINI 等[74]采用 PS-InSAR 技术并借助 L 波段 ALOS 数据,完成西班牙南部岛屿(约 70 km^2)滑坡隐患识别及活动性分析。此阶段,学者们逐步认识到 InSAR 在大范围滑坡隐患筛查中可以发挥不可替代的作用。

2015—2019 年期间,国际 InSAR 滑坡隐患识别研究的年均发文量增至 15 篇,标志着该技术进入广泛应用阶段。代表性案例如下:JOURNAULT 等[75]基于 RADARSAT-2 数据对普森河谷滑坡位移进行评估,识别出 6 处活动斜坡;HANDWERGER 等[76]利用 ALOS-1 数据在北加州海岸山脉约 14 000 km^2范围内定位 50 个缓慢移动滑坡;BOUALI 等[77]整合 34 景 ENVISAT 与 40 景 COSMO-SkyMed 影像,实现加州帕洛斯维德半岛 263 处潜在滑坡识别。在此阶段,意大利[25,78-79]、挪威[80]及德国[81]相继完成国家/洲际尺度的广域 InSAR 滑坡隐患识别(图 6(a)、6(b)),全面支撑地质灾害调查工作。该进展主要得益



(a)国际上滑坡隐患InSAR识别发文统计;(b)国际上滑坡隐患InSAR识别文献对应的学科分类

图4 国际上滑坡隐患InSAR识别发文现状

Fig. 4 Overview of International Research on InSAR-Based Landslides Identification

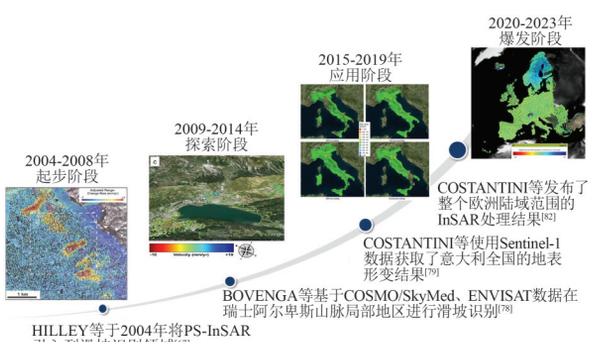
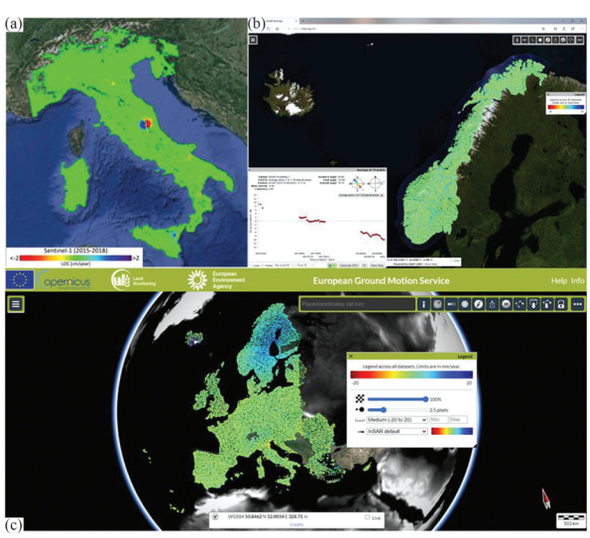


图5 国际上滑坡隐患InSAR识别的发展时间线

Fig. 5 Chronological Development of InSAR Applications for Landslide Identification Worldwide

于Sentinel-1数据的充分存档与全球覆盖,辅以高性能超级计算平台的应用,共同实现了以欧洲为主的国家尺度滑坡隐患识别。

2020—2024年期间,年均发文量超过30篇且增速趋于稳定,表明该技术在国际上获得广泛认可并进入成熟应用阶段。最具代表性的案例为欧洲环境署主导实施的欧洲地表形变服务(European ground motion service,EGMS),其旨在提供洲际尺度的地表形变InSAR监测与应用服务,并发布了覆盖整个欧洲大陆的先进InSAR处理示范成果[82]及相关结果(图6(c))。EGMS不仅实现了空间上从单图幅到区域尺度的InSAR监测模式转型,显著拓展了从业者对广域多尺度地表形变场的观测视角;更通过将SAR影像至形变结果的中间处理流程标准化,直接输出InSAR形变产品,推动该技术在科学研究与多元行业的渗透应用,为未来InSAR跨行业融合应用提供了新范式。



(a)意大利全域InSAR形变监测结果[25];(b)挪威全域InSAR形变监测结果[80];(c)欧洲全域InSAR形变监测结果

图6 国家和洲际尺度广域滑坡隐患InSAR识别及其形变监测结果

Fig. 6 InSAR-Derived Landslides Identification and Deformation Monitoring Across National and Intercontinental Scales

3 技术挑战与发展趋势

3.1 SAR卫星未来发展

SAR卫星的迅猛发展为InSAR技术进步提供了重要机遇,不少技术瓶颈与应用挑战有望随硬件性能提升而逐步解决。未来5年内,L波段

卫星观测资源将显著扩充。随着高性能星载SAR系统(如中国L波段陆探一号、美国NISAR卫星及日本ALOS-4卫星)相继发射(图7),长波长、高分辨率SAR数据的获取将有效提升滑坡隐患InSAR识别精度与监测质量。另外需特别关注的是,以涪城一号、“神启号”为代表的国产商业SAR微卫星蓬勃发展,其兼具高空间分辨率与灾后快速响应能力,可为滑坡精细识别与应急救灾提供关键数据支撑。当前已投入运行的Ku波段与P波段SAR卫星在地质灾害领域的应用潜力尚未充分发掘,有望成为特定防灾场景的革新性技术手段。SAR时空分辨率提升、时序InSAR处理技术成熟、人工智能与图形处理器(graphics processing unit,GPU)计算加速等关键要素的协同发展,将有力推动InSAR技术在地质灾害防治等领域的工程化应用与规模化推广。

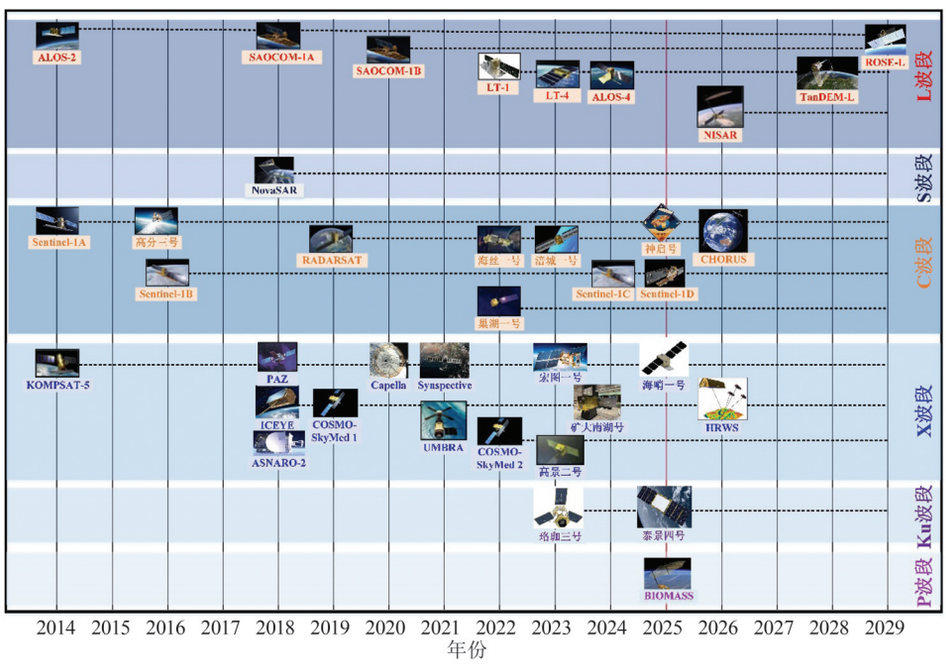


图7　SAR卫星未来发展

Fig. 7　Future Trends in the Development of SAR Satellite

3.2　主要技术挑战

综合审视上述国内外研究现状,可以发现近3年来国内外InSAR滑坡隐患广域识别领域的研究论文数量增长相对平缓,表明算法基础性研究或突破性发现的产出节奏有所放缓,显著提升监测性能的创新算法(如SBAS-InSAR等)鲜有出现。与此形成对比的是,InSAR技术在地质灾害隐患早期识别中的广域应用得到全面推广,似乎已从探索阶段迈入全面推广阶段。然而,在部分InSAR观测困难区域(如植被茂密区、高海拔陡峭地形区、地表形变梯度剧烈区),其识别结果的精度与可靠性仍面临严峻挑战,主要技术挑战集中在以下3个方面:

1)低相干区域形变信息的精确提取。相干性是开展精准干涉测量获取形变信息的必要条件,尽管国家级或整个欧洲的广域识别已经成功开展,但是在植被覆盖区、陡坡地形及季节性积雪带等低相干区域,InSAR形变监测面临相位失相干但缺少有效解决方案的核心瓶颈。近年来,研究者从滤波方法优化、研发角反射器等方面尝试突破相干性局限。

在滤波方法优化方面,传统滤波在低相干区易导致信号过度平滑,深度学习辅助相位滤波成为焦点。如LIU等[83]利用非局部最小均方误差方法优化多主影像对应的干涉图,使植被覆盖区的相位质量得以提升,并增加相干点密度。为克服自然散射体密度不足的缺陷,角反射器方法一直是10年以来的研究热点,不同形式的角反射器被提出与应用[40, 84-87]。如XIA等[87]分析了二面角反射器在坡体位移监测中的效能,进而实现TerraSAR-X图像中的回波强度提升了约30 dB,同时信杂比超过25 dB。但是角反射器受限于需要人工现场安置及整体解算效果,仍未实现高植被覆盖区域的大面积工程应用,整体进展稍显缓慢。

2)InSAR测量可探测性的明确界定。InSAR测量的可探测性是实现滑坡隐患广域识别的基础保障,也是推动InSAR技术工程化应用必须明确的核心挑战之一。通过系统评估可探测

性,可明确观测盲区与信号失真成因及正确解译形变结果,为识别策略设计、结果解译与风险判定提供理论依据与方法支撑。

当前研究主要集中在两个方向:其一为空间可探测性,由于SAR侧视成像,几何畸变不可避免,会导致部分滑坡区域成为观测盲区。针对这个问题,诸多研究[14,32,57,88]通过考虑不同类型的几何畸变,建立了详细的几何畸变识别方法,包括识别被动几何畸变等[88]。在高精度数字高程模型辅助下,几何畸变区域在InSAR处理中已能准确识别。然而,由于几何畸变属于成像机制所固有的属性,除通过升降轨联合观测[49]以减少盲区范围外,目前尚缺乏更为有效的解决方案。除几何畸变外,植被覆盖、坡度坡向、最大可探测梯度等也是影响空间探测性的重要因素,DAI等[22]提出了顾及地形的InSAR最大可探测位移函数模型,明确了InSAR在山区针对任意坡度坡向斜坡体的最大可探测形变梯度。CHEN等[89]提出了考虑植被覆盖和形变梯度等综合因素的InSAR位移监测适宜性评估方法,实现了InSAR处理前的可探测性空间预估。其二为形变强度可探测性,即当地表形变量超过InSAR的相位梯度极限(如高速滑动或突变形变)时,将导致干涉信号出现严重失真甚至完全丢失。理论上,相位梯度极限约为波长的1/4,被认为是InSAR形变强度可探测性的边界[90]。针对大梯度形变导致的监测失效问题,偏移量追踪技术仍是目前最有效的补充手段。例如,CHEN等[91]结合InSAR与像素偏移追踪方法,提取毫米至米级的形变量,成功识别出河西走廊的广域滑坡隐患。然而,快速运动的滑坡会造成像素偏移追踪方法的失相干,并且偏移量追踪的精度较低,仅能达到影像分辨率的1/10像素,从而导致在识别快速运动的滑坡时仍存在一定局限性。

3)广域InSAR时序分析的计算效率提升。在广域InSAR时序分析过程中,涉及的多时相干涉图生成、相位解缠、时空滤波、时序形变提取等复杂流程加剧了计算负担,特别是随着SAR数据分辨率和时序计算长度的提升(3~5年以上),广域处理耗时过长成为一大阻碍。近年来,深度学习方法与GPU并行计算架构的融合为突破这一处理瓶颈提供了新路径。

2019年,YU等[92]提出了针对Sentinel-1渐进扫描成像模式数据的GPU加速处理架构,实现了配准、重采样和相干估计等关键模块的加速,速度提升达140倍以上,大幅提升了广域滑坡时序监测的时效性和可行性。LI等[93]结合SBAS-InSAR时间序列方法与GPU架构,构建了滑坡监测的快速处理链,有效缩短了整体处理时间。GAO等[94]通过GPU并行化实现了区域化相位解缠,处理速度较传统中央处理器方法提升约30倍,适用于大型复杂干涉图的高效处理。此外,CHEN等[95]提出的ResDANet模型通过双注意力机制显著提升了二维相位解缠的精度和鲁棒性,适用于复杂山地环境。总体来看,GPU加速技术与深度学习模型的不断融合,推动了InSAR处理流程在滑坡监测中实现速度与精度的双重突破,为未来高频次、高分辨率、大范围地表灾害监测与早期预警提供支撑。

随着InSAR技术在地表形变监测与灾害预警等领域的广泛应用,以及伴随着数据精度和数据量的快速增长,星上计算作为提升数据处理效率和降低下行数据量的关键技术[96],也是当下的研究热点。早在2000年前后,美国便开展了SAR卫星的星上实时成像与在轨数据处理相关研究。近年来,国内SAR卫星相继集成了星上实时处理模块,提升在轨作业能力和数据处理效率[97]。

中国2020年发射的SAR卫星“海丝一号”配备智能处理模块,开展SAR数据的在轨预处理与智能目标识别[98]。星上智能处理模块(简称AI(artificial intelligence)载荷)可开展SAR数据在轨预处理与智能化目标检测,提升雷达卫星在轨工作效能,实现对重点观测区域目标的实时地理位置获取[99]。2021年发射的高分三号02星增加了星上实时处理器,在特定观测模式下可以进行即时数据处理,同时基于现场可编程门阵列与数字信号处理器架构,实现了星上快速成像,显著缩短了地面获取影像的时间窗口,在应急救援领域有着重要意义,节约了小时级的地面图像获取流程[100]。2022年发射升空的“巢湖一号”SAR卫星同样具备了在轨成像、AI处理,以及6 h应急成像的能力[97]。

当前,星上干涉处理技术已实现较高的下行数据压缩,显著减轻地面站数据接收与处理负担,有效缓解了传统InSAR系统因数据量庞大导致的通信瓶颈问题。随着卫星载荷计算能力的持续提升,结合高性能边缘计算和AI算法的引入,星上InSAR处理的实时性和智能化水平有望得到进一步提升,为实现大范围、高精度、实时的地表形变监测提供坚实的技术支撑。

4　结　语

本文系统回顾了中国滑坡隐患 InSAR 广域识别技术的发展历程与研究背景。2017 年以来,新磨村滑坡、白格滑坡等灾难性滑坡事件的发生,促使政府、学术界及工程界对该技术高度重视,从而有力推动了 InSAR 在滑坡广域识别领域的高速发展。同时综述了国内外滑坡隐患 InSAR 识别的现状与进展。相关研究文献的内容分布与数量增长均表明,当前滑坡 InSAR 广域识别技术,无论在国内还是国际范围,均已步入广泛应用阶段,而不再局限于技术探索层面。在此基础上,本文进一步归纳了该领域的发展趋势与技术挑战:尽管应用日益广泛,但在低相干区域形变信息的精确提取、InSAR 测量可探测性的明确界定以及广域 InSAR 时序分析的计算效率提升等方面,仍面临显著困难与挑战。同时,SAR 数据时空分辨率的持续提高、AI 算法的深度融合以及星上计算能力的发展,将成为支撑并引领未来 InSAR 技术发展的重要趋势。

致谢:感谢中国地质调查局成都地质调查中心、四川省公路规划勘察设计研究院有限公司、陕西省地质调查院、成都市勘察测绘研究院、成都市规划和自然资源局、四川省综合地质调查研究所、四川省地质调查研究院、四川省国土整治中心等单位在滑坡隐患 InSAR 广域识别应用中的交流讨论。

参　考　文　献

[1] 黄润秋, 许强. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
HUANG Runqiu, XU Qiang. Catastrophic Landslides in China[M]. Beijing: Science Press, 2008.

[2] 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 360-374.
XU Qiang. Understanding the Landslide Monitoring and Early Warning: Consideration to Practical Issues[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(2): 360-374.

[3] 许强, 董秀军, 李为乐. 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), 2019, 44(7): 957-966.
XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated Space-Air-Ground Early Detection, Monitoring and Warning System for Potential Catastrophic Geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 957-966.

[4] DAI K R, XU Q, LI Z H, et al. Post-Disaster Assessment of 2017 Catastrophic Xinmo Landslide (China) by Spaceborne SAR Interferometry[J]. *Landslides*, 2019, 16(6): 1189-1199.

[5] MENG W L, XU Y S, CHENG W C, et al. Landslide Event on 24 June in Sichuan Province, China: Preliminary Investigation and Analysis[J]. *Geosciences*, 2018, 8(2): 39.

[6] 许强, 郑光, 李为乐, 等. 2018 年 10 月和 11 月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1534-1551.
XU Qiang, ZHENG Guang, LI Weile, et al. Study on Successive Landslide Damming Events of Jinsha River in Baige Village on Octorber 11 and November 3, 2018 [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1534-1551.

[7] ZHANG L M, XIAO T, HE J, et al. Erosion-Based Analysis of Breaching of Baige Landslide Dams on the Jinsha River, China, in 2018[J]. *Landslides*, 2019, 16(10): 1965-1979.

[8] 胡屿, 张楠, 吴东燃, 等. 贵州金海湖新区田湾子滑坡活动特征及成因机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 11-19.
HU Yu, ZHANG Nan, WU Dongran, et al. Analysis on the Characteristics and Mechanism of Tianwanzi Landslide in Jinhaihu Newly Liberated Area, Guizhou Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(5): 11-19.

[9] TAO T W, SHI W B, LIANG F, et al. Failure Mechanism and Evolution of the Jinhaihu Landslide in Bijie City, China, on January 3, 2022[J]. *Landslides*, 2022, 19(11): 2727-2736.

[10] RONG G, ZHANG J. Risk Assessment of Extreme Precipitation-Geological Hazard Chains in the Yunnan-Guizhou Plateau[C]// The 10th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2022),Beijing,China, 2023.

[11] 许强, 陆会燕, 李为乐, 等. 滑坡隐患类型与对应识别方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(3): 377-387.
XU Qiang, LU Huiyan, LI Weile, et al. Types of Potential Landslide and Corresponding Identification Technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(3): 377-387.

[12] 付豪, 李为乐, 陆会燕, 等. 基于"三查"体系的丹巴县滑坡隐患早期识别与监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(5): 734-746.
FU Hao, LI Weile, LU Huiyan, et al. Early Detection and Monitoring of Potential Landslides in Danba County Based on the Space-Air-Ground Investigation System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(5): 734-746.

[13] 许强, 朱星, 李为乐, 等. "天-空-地"协同滑坡监测

技术进展[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1416-1436.
XU Qiang, ZHU Xing, LI Weile, et al. Technical Progress of Space-Air-Ground Collaborative Monitoring of Landslide[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1416-1436.

[14] 戴可人, 铁永波, 许强, 等. 高山峡谷区滑坡灾害隐患InSAR早期识别: 以雅砻江中段为例[J]. 雷达学报, 2020, 9(3): 554-568.
DAI Keren, TIE Yongbo, XU Qiang, et al. Early Identification of Potential Landslide Geohazards in Alpine-Canyon Terrain Based on SAR Interferometry—A Case Study of the Middle Section of Yalong River[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(3): 554-568.

[15] 陆会燕, 李为乐, 许强, 等. 光学遥感与InSAR结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(9): 1342-1354.
LU Huiyan, LI Weile, XU Qiang, et al. Early Detection of Landslides in the Upstream and Downstream Areas of the Baige Landslide, the Jinsha River Based on Optical Remote Sensing and InSAR Technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1342-1354.

[16] 郭华东, 邵芸, 王长林. 雷达对地观测理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
GUO Huadong, SHAO Yun, WANG Changlin. Radar for Earth Observation[M]. Beijing: Science Press, 2000.

[17] 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.
LIAO Mingsheng, ZHANG Lu, SHI Xuguo, et al. Remote Sensing Monitoring Method and Practice of Landslide Deformation Radar[M]. Beijing: Science Press, 2017.

[18] CROSETTO M, MONSERRAT O, CUEVAS-GONZÁLEZ M, et al. Persistent Scatterer Interferometry: A Review[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 115: 78-89.

[19] 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.

[20] 李振洪, 朱武, 余琛, 等. 影像大地测量与灾害动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2025.
LI Zhenhong, ZHU Wu, YU Chen, et al. Image Geodesy and Disaster Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2025.

[21] 戴可人, 吴明堂, 卓冠晨, 等. 西南山区大型水电工程库岸滑坡InSAR早期识别与监测研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(3): 559-577.
DAI Keren, WU Mingtang, ZHUO Guanchen, et al. Review on InSAR Early Identification and Monitoring of Reservoir Landslides for Large Hydropower Engineering Projects in Southwest Mountainous Area of China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2023, 45(3): 559-577.

[22] DAI K R, CHEN Y D, XU Q, et al. A Functional Model for Determining Maximum Detectable Deformation Gradients of InSAR Considering the Topography in Mountainous Areas[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5211211.

[23] HE Y, ZHAO Z A, ZHU Q, et al. An Integrated Neural Network Method for Landslide Susceptibility Assessment Based on Time-Series InSAR Deformation Dynamic Features[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2024, 17(1): 2295408.

[24] DAI K R, LI Z H, XU Q, et al. Entering the Era of Earth Observation-Based Landslide Warning Systems: A Novel and Exciting Framework[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2020, 8(1): 136-153.

[25] FESTA D, BONANO M, CASAGLI N, et al. Nation-Wide Mapping and Classification of Ground Deformation Phenomena Through the Spatial Clustering of P-SBAS InSAR Measurements: Italy Case Study[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 189: 1-22.

[26] HERRERA G, GUTIÉRREZ F, GARCÍA-DAVALILLO J C, et al. Multi-sensor Advanced DInSAR Monitoring of very Slow Landslides: The Tena Valley Case Study (Central Spanish Pyrenees)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 128: 31-43.

[27] NOVELLINO A, CIGNA F, SOWTER A, et al. Exploitation of the Intermittent SBAS (ISBAS) Algorithm with COSMO-SkyMed Data for Landslide Inventory Mapping in North-Western Sicily, Italy[J]. *Geomorphology*, 2017, 280: 153-166.

[28] 李振洪, 朱武, 余琛, 等. 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, 2022, 51(7): 1485-1519.
LI Zhenhong, ZHU Wu, YU Chen, et al. Interferometric Synthetic Aperture Radar for Deformation Mapping: Opportunities, Challenges and the Outlook[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1485-1519.

[29] SOLARI L, DEL SOLDATO M, MONTALTI R, et al. A Sentinel-1 Based Hot-Spot Analysis: Landslide Mapping in North-Western Italy[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(20): 7898-7921.

[30] 李振洪, 朱武, 余琛, 等. 影像大地测量学发展现状与趋势[J]. 测绘学报, 2023, 52(11): 1805-1834.
LI Zhenhong, ZHU Wu, YU Chen, et al. Development Status and Trends of Imaging Geodesy[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(11):

1805-1834.

[31] 国土资源部."国土资源部:打造地质灾害群测群防体系“升级版”_部门政务_中国政府网[EB/OL]. [2017-01-17] https://www.gov.cn/xinwen/2017-01/21/content_5161590.htm.
Ministry of Land and Resources: Creating an “Upgraded Version” of the Geological Disaster Community Monitoring and Prevention System[EB/OL]. [2017-01-17] https://www.gov.cn/xinwen/2017-01/21/content_5161590.htm.

[32] DAI K R, DENG J, XU Q, et al. Interpretation and Sensitivity Analysis of the InSAR Line of Sight Displacements in Landslide Measurements[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2022, 59(1): 1226-1242.

[33] LIU X J, ZHAO C Y, ZHANG Q, et al. 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*, 2020, 47(3): e2019GL086142.

[34] LI M H, ZHANG L, DING C, et al. Retrieval of Historical Surface Displacements of the Baige Landslide from Time-Series SAR Observations for Retrospective Analysis of the Collapse Event[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 240: 111695.

[35] 杨昭颖,地质灾害隐患遥感智能识别研讨会召开.[EB/OL].[2019-11-28] https://www.xsbn.gov.cn/xsbnzgtzyj/19727.news.detail.dhtml?news_id=467739.
YANG Zhaoying. The International Workshop on Remote Sensing Intelligent Identification of Potential Geological Disaster Was Convened[EB/OL].[2019-11-28] https://www.xsbn.gov.cn/xsbnzgtzyj/19727.news.detail.dhtml?news_id=467739.

[36] 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室. 全国40米分辨率5毫米/年精度地表形变一张图发布[EB/OL]. [2022-08-22] https://liesmars.whu.edu.cn/info/1056/6552.htm.
The State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University. The national Map of Surface Deformation with a Resolution of 40 m and a Precision of 5 mm/a has Been Released[EB/OL]. [2022-08-22] https://liesmars.whu.edu.cn/info/1056/6552.htm.

[37] 泰伯网. 全国地表形变一张图2.0”和首张“一带一路国家地表形变一张图”隆重发布[EB/OL]. [2023-11-10] https://www.taibo.cn/p/93536.
Taibo Network. The “National Surface Deformation Map 2.0” and the First “Belt and Road Countries Surface Deformation Map” Were Grandly Released[EB/OL]. [2023-11-10] https://www.taibo.cn/p/93536.

[38] 慧天地. 中国测绘科学研究院利用自主研发的InSAR超算平台开展全国地表形变监测——用超级大脑“揪”出地灾隐患点[EB/OL]. [2023-05-23] https://mp.weixin.qq.com/s/unA9-FW-XrkWP-Tq0nUsdfA.
Geomaticer. The Chinese Academy of Surveying and Mapping Utilizes Its Independently Developed InSAR Supercomputing Platform to Carry out Nationwide Surface Deformation Monitoring — Using a “Super Brain” to Detect Potential Geohazard Risks[EB/OL]. [2023-05-23] https://mp.weixin.qq.com/s/unA9-FW-XrkWPTq0nUsdfA.

[39] XIA Y, KAUFMANN H, GUO X. Differential SAR Interferometry Using Corner Reflectors[J]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2002, 2:1243-1246.

[40] YE X, KAUFMANN H, GUO X F. Landslide Monitoring in the Three Gorges Area Using D-INSAR and Corner Reflectors[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, 70(10): 1167-1172.

[41] SHI X G, 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.

[42] TANG H M, WASOWSKI J, JUANG C H. Geohazards in the Three Gorges Reservoir Area, China - Lessons Learned from Decades of Research[J]. *Engineering Geology*, 2019, 261: 105267.

[43] ZHOU C, YIN K L, CAO Y, et al. Application of Time Series Analysis and PSO - SVM Model in Predicting the Bazimen Landslide in the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Engineering Geology*, 2016, 204: 108-120.

[44] WANG T, PERISSIN D, LIAO M S, et al. Deformation Monitoring by Long Term D-InSAR Analysis in Three Gorges Area, China[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, MA, USA, 2008.

[45] WANG T, PERISSIN D, ROCCA F, et al. Three Gorges Dam Stability Monitoring with Time-Series InSAR Image Analysis[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(5): 720-732.

[46] LIU P, LI Z H, HOEY T, et al. Using Advanced InSAR Time Series Techniques to Monitor Landslide Movements in Badong of the Three Gorges Region, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21: 253-264.

[47] YIN Y P, ZHENG W M, LIU Y P, et al. Integration of GPS with InSAR to Monitoring of the Jiaju Landslide in Sichuan, China[J]. *Landslides*, 2010,

7(3): 359-365.

[48] CHEN Q, CHENG H Q, YANG Y H, et al. Quantification of Mass Wasting Volume Associated with the Giant Landslide Daguangbao Induced by the 2008 Wenchuan Earthquake from Persistent Scatterer InSAR[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 125-135.

[49] DAI K R, LI Z H, TOMÁS R, et al. Monitoring Activity at the Daguangbao Mega-Landslide (China) Using Sentinel-1 TOPS Time Series Interferometry [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 501-513.

[50] ZHANG L L, DAI K R, DENG J, et al. Identifying Potential Landslides by Stacking-InSAR in Southwestern China and Its Performance Comparison with SBAS-InSAR[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(18): 3662.

[51] DONG J, LIAO M S, XU Q, et al. Detection and Displacement Characterization of Landslides Using Multi-Temporal Satellite SAR Interferometry: A Case Study of Danba County in the Dadu River Basin [J]. *Engineering Geology*, 2018, 240: 95-109.

[52] 张路, 廖明生, 董杰, 等. 基于时间序列InSAR分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别: 以四川丹巴为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2039-2049.
ZHANG Lu, LIAO Mingsheng, DONG Jie, et al. Early Detection of Landslide Hazards in Mountainous Areas of West China Using Time Series SAR Interferometry—A Case Study of Danba, Sichuan [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2039-2049.

[53] DONG J, ZHANG L, TANG M G, 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.

[54] KANG Y, ZHAO C Y, ZHANG Q, et al. Application of InSAR Techniques to an Analysis of the Guanling Landslide[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(10): 1046.

[55] ZHAO C Y, KANG Y, ZHANG Q, et al. Landslide Identification and Monitoring Along the Jinsha River Catchment (Wudongde Reservoir Area), China, Using the InSAR Method[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10, (7):993.

[56] LIU X J, ZHAO C Y, ZHANG Q, et al. Integration of Sentinel-1 and ALOS/PALSAR-2 SAR Datasets for Mapping Active Landslides Along the Jinsha River Corridor, China[J]. *Engineering Geology*, 2021, 284: 106033.

[57] DUN J W, FENG W K, YI X Y, et al. Detection and Mapping of Active Landslides Before Impoundment in the Baihetan Reservoir Area (China) Based on the Time-Series InSAR Method [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(16): 3213.

[58] 戴可人, 张乐乐, 宋闯, 等. 川藏铁路沿线Sentinel-1影像几何畸变与升降轨适宜性定量分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1450-1460.
DAI Keren, ZHANG Lele, SONG Chuang, et al. Quantitative Analysis of Sentinel-1 Imagery Geometric Distortion and Their Suitability Along Sichuan-Tibet Railway [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1450-1460.

[59] 姜春生, 汪剑, 何玉童. 地基合成孔径雷达在大坝安全监测中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(2): 146-149.
JIANG Chunsheng, WANG Jian, HE Yutong. Application of Ground Synthetic Aperture Radar in Dam Safety Monitoring [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2017, 28(2): 146-149.

[60] 杨潇潇. 时序InSAR技术用于大坝形变监测与变形模式研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
YANG Xiaoxiao. Application of Time-Series InSAR Technology to Dam Deformation Monitoring and Deformation Mode Research[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.

[61] GUO Y H, YANG Z Q, YANG Y, et al. Experimental Study on Deformation Monitoring of Large Landslide in Reservoir Area of Hydropower Station Based on GB-InSAR[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021(1): 5586340.

[62] WANG Y A, DONG J, ZHANG L, et al. Refined InSAR Tropospheric Delay Correction for Wide-Area Landslide Identification and Monitoring[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 275: 113013.

[63] GOU Y T, ZHANG L, CHEN Y, et al. Monitoring Seasonal Movement Characteristics of the Landslide Based on Time-Series InSAR Technology: The Cheyiping Landslide Case Study, China[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(1): 51.

[64] 吴明辕, 罗明, 刘岁海. 基于光学遥感与InSAR技术的潜在滑坡与老滑坡综合识别: 以滇西北地区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 84-93.
WU Mingyuan, LUO Ming, LIU Suihai. Comprehensive Identification of Potential and Old Landslides Based on Optical Remote Sensing and InSAR Technologies: A Case Study in Northwestern Yunnan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(3): 84-93.

[65] 陈舒. 地灾隐患识别:寻找大地上的潜伏者[EB/OL]. [2021-05-10] https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MjM5NTk2MjY1Mw==&mid=2651319794&idx=1&sn=dad75c5ffb3efad29b21744fb5edf22b&chksm=

bd03c7808a744e9647b3db4cdcc25ddfa1da1a2c30c03dad24e058e4a3eab09163664be93b7d&scene=27.
CHEN Shu. Geohazard Risk Identification: Uncovering the "Hidden Threats" Beneath the Earth [EB/OL]. [2021-05-10] https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MjM5NTk2MjY1Mw==&mid=26513197-94&idx=1&sn=dad75c5ffb3efad29b21744fb5edf22b&chksm=bd03c7808a744e9647b3db4cdcc25ddfa1da1a2c30c03dad24e058e4a3eab09163664be93b7d&scene=27.

[66] 刘洋. 自然资源部:在轨 19 颗! 我国自然资源卫星观测能力进一步提升[EB/OL]. [2021-05-10] https://m.news.cctv.com/2021/08/21/ARTIvCVVEYyNudMukLX561FF210821.shtml.
LIU Yang. Ministry of Natural Resources: 19 Satellites in Orbit! China's Natural Resource Satellite Observation Capabilities Further Enhanced [EB/OL]. [2021-05-10] https://m.news.cctv.com/2021/08/21/ARTIvCVVEYyNudMukLX561FF210821.shtml.

[67] HILLEY G E, BÜRGMANN R, FERRETTI A, et al. Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis [J]. *Science*, 2004, 304(5679): 1952-1955.

[68] COLESANTI C, FERRETTI A, PRATI C, et al. Monitoring Landslides and Tectonic Motions with the Permanent Scatterers Technique[J]. *Engineering Geology*, 2003, 68(1): 3-14.

[69] COLESANTI C, WASOWSKI J. Satellite SAR Interferometry for Wide-Area Slope Hazard Detection and Site-Specific Monitoring of Slow Landslides [C]//The 9th International Symposium on Landslides, Rio de Janeiro ,Brazil, 2004.

[70] COLESANTI C, WASOWSKI J. Investigating Landslides with Space-Borne Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry [J]. *Engineering Geology*, 2006, 88(3/4): 173-199.

[71] RIEDEL B, WALTHER A. InSAR Processing for the Recognition of Landslides[J]. *Advances in Geosciences*, 2008, 14: 189-194.

[72] LAUKNES T R, PIYUSH SHANKER A, DEHLS J F, et al. Detailed Rockslide Mapping in Northern Norway with Small Baseline and Persistent Scatterer Interferometric SAR Time Series Methods [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(9): 2097-2109.

[73] BOVENGA F, WASOWSKI J, NITTI D O, et al. Using COSMO/SkyMed X-Band and ENVISAT C-Band SAR Interferometry for Landslides Analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 119: 272-285.

[74] BIANCHINI S, HERRERA G, MATEOS R, et al. Landslide Activity Maps Generation by Means of Persistent Scatterer Interferometry[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(12): 6198-6222.

[75] JOURNAULT J, MACCIOTTA R, HENDRY M T, et al. Measuring Displacements of the Thompson River Valley Landslides, South of Ashcroft, BC, Canada, Using Satellite InSAR[J]. *Landslides*, 2018, 15(4): 621-636.

[76] HANDWERGER A L, ROERING J J, SCHMIDT D A, et al. Kinematics of Earthflows in the Northern California Coast Ranges Using Satellite Interferometry [J]. *Geomorphology*, 2015, 246: 321-333.

[77] BOUALI E H, OOMMEN T, ESCOBAR-WOLF R. Mapping of Slow Landslides on the Palos Verdes Peninsula Using the California Landslide Inventory and Persistent Scatterer Interferometry [J]. *Landslides*, 2018, 15(3): 439-452.

[78] DI MARTIRE D, PACI M, CONFUORTO P, et al. A Nation-Wide System for Landslide Mapping and Risk Management in Italy: The Second Not-Ordinary Plan of Environmental Remote Sensing [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 63: 143-157.

[79] COSTANTINI M, FERRETTI A, MINATI F, et al. Analysis of Surface Deformations over the Whole Italian Territory by Interferometric Processing of ERS, Envisat and COSMO-SkyMed Radar Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 250-275.

[80] DEHLS J F, LARSEN Y, MARINKOVIC P, et al. InSAR.No: A National Insar Deformation Mapping/Monitoring Service in Norway: From Concept to Operations[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019.

[81] KALIA A C, FREI M, LEGE T. A Copernicus Downstream-Service for the Nationwide Monitoring of Surface Displacements in Germany [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 234-249.

[82] COSTANTINI M, MINATI F, TRILLO F, et al. EGMS: Europe-Wide Ground Motion Monitoring Based on Full Resolution InSAR Processing of all Sentinel-1 Acquisitions [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Kuala Lumpur, Malaysia, 2022.

[83] LIU Y F, YANG H L, FAN J H, et al. NL-MMSE: A Hybrid Phase Optimization Method in Multimaster Interferogram Stack for DS-InSAR Applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15: 8332-8345.

[84] BOVENGA F, PASQUARIELLO G, PELLICANI R, et al. Landslide Monitoring for Risk Mitigation by Using Corner Reflector and Satellite SAR Interferometry: The Large Landslide of Carlantino (Italy)[J]. *CATENA*, 2017, 151: 49-62.

[85] FU W X, GUO H D, TIAN Q J, et al. Landslide Monitoring by Corner Reflectors Differential Interferometry SAR[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(24): 6387-6400.

[86] SCHLÖGEL R, THIEBES B, MULAS M, et al. Multi-Temporal X-Band Radar Interferometry Using Corner Reflectors: Application and Validation at the Corvara Landslide (Dolomites, Italy)[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 739.

[87] XIA Z, MOTAGH M, LI T. Performance Analysis of Dihedral Corner Reflectors for Slope Movements: A Case Study from Aniangzhai Landslide in China [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1-5
ZHUGE X, MOTAGH M, LI T. Performance Analysis of Dihedral Corner Reflectors for Slope Movements: A Case Study from Aniangzhai Landslide in China[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 4515605.

[88] 卓冠晨,戴可人,周福军,等. 川藏交通廊道典型工点InSAR监测及几何畸变精细判识[J]. 地球科学, 2022, 47(6):2031-2047.
ZHUO Guanchen, DAI Keren, ZHOU Fujun, et al. Monitoring Typical Construction Sites of Sichuan-Tibet Traffic Corridor by InSAR and Intensive Distortion Analysis[J]. *Earth Science*, 2022, 47(6): 2031-2047.

[89] CHEN Y D, DAI K R, CHANG L, et al. The Pre-Processing InSAR Feasibility Assessment Method for Wide-Area Slope Displacement Monitoring [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2025, 136: 104336.

[90] HANSSEN R F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis[M]. Netherlands: Kliwer Academic Publishers,2001

[91] CHEN B, LI Z H, SONG C, et al. Automatic Detection of Active Geohazards with Millimeter-to-Meter-Scale Deformation and Quantitative Analysis of Factors Influencing Spatial Distribution: A Case Study in the Hexi Corridor, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, 131: 103995.

[92] YU Y H, BALZ T, LUO H, et al. GPU Accelerated Interferometric SAR Processing for Sentinel-1 TOPS Data[J]. *Computers & Geosciences*, 2019, 129: 12-25.

[93] LI Y S, JIANG W L, ZHANG J F. A Time Series Processing Chain for Geological Disasters Based on a GPU-Assisted Sentinel-1 InSAR Processor[J]. *Natural Hazards*, 2022, 111(1): 803-815.

[94] GAO J, JIANG H J, SUN Z C, et al. A Parallel InSAR Phase Unwrapping Method Based on Separated Continuous Regions[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(5): 1370.

[95] CHEN X M, ZHANG S S, QIN X F, et al. Robust Two-Dimensional InSAR Phase Unwrapping via FPA and GAU Dual Attention in ResDANet [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(6): 1058.

[96] 呼延烺,李映,周诠,等. 遥感卫星计算传输及其关键技术[J]. 天地一体化信息网络, 2022(2): 63-71.
HU Yanlang, LI Ying, ZHOU Quan, et al. Remote Satellites Computing Transmission and Key Technologies[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2022(2): 63-71.

[97] 星测未来. 高性能计算助力卫星智能化. [EB/OL]. [2022-08-31] https://mp.weixin.qq.com/s/mbQT4VkcI-i7iUJysnYXJw.
Star Detect. High-Performance Computing Helps Make Satellites Smarter [EB/OL]. [2022-08-31] https://mp.weixin.qq.com/s/mbQT4VkcI-i7iUJysnYXJw.

[98] 天仪研究院. 长八首飞成功! 国内首颗商业SAR卫星海丝一号及科学实验卫星元光号收到遥测信号![EB/OL]. [2020-12-22] https://cn.spacety.com/news/detail/3.
Spacety Co. Ltd. The Long March 8 Rocket Successfully Completed Its Maiden Flight! The First Domestic Commercial SAR Satellite, Haisi No. 1, and the Scientific Experiment Satellite, Yuanguang No. 1, have Received Telemetry Signals! [EB/OL]. [2020-12-22] https://cn.spacety.com/news/detail/3.

[99] 窦玥. 跟着长征八号上天了! 高精尖中心研制的星上处理AI载荷搭载SAR卫星首次在轨验证. [EB/OL]. [2020-12-23] https://mp.weixin.qq.com/s/EdyI3gdEEDJjzuiUl77rtA.
DOU Yue. Launched into Space Aboard the Long March 8 Rocket! The High-Precision AI Payload Developed by the High-Precision Technology Center was Carried Aboard a SAR Satellite for Its First In-Orbit Verification [EB/OL]. [2020-12-23] https://mp.weixin.qq.com/s/EdyI3gdEEDJjzuiUl77rtA.

[100] 星测未来. 星上AI如何助力卫星数据应用?[EB/OL]. [2020-12-22] https://mp.weixin.qq.com/s/ZvBGwac7OyZJjZ3e8lm2Ew.
Star Detect. How Does Star AI Help with Satellite Data Applications?[EB/OL]. [2020-12-22] https://mp.weixin.qq.com/s/ZvBGwac7OyZJjZ3e8lm2Ew.