

北斗在地质灾害领域的应用现状与展望

何祥丽, 许冲, 黄远东

Status and prospects of Beidou applications in geological disaster management

HE Xiangli, XU Chong, and HUANG Yuandong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202406004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于“3S”技术的地质灾害监测预警系统在我国应用现状

Review on geological disaster monitoring and early warning system based on “3S” technology in China

张凯翔 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 1-11

自然灾害风险防控和应急救援平台构建与实践

Construction and application of natural disaster risk control and emergency rescue management platform: A case study in Zhejiang Province

张磊, 吴彬卓, 滕舟斌 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(4): 134-142

青海省地质灾害监测预警信息化平台建设与实践

Construction and realization of information platform for geological disaster monitoring and early warning in Qinghai Province

隋嘉, 孙皓, 张丽华, 辛倩男, 孙永旺, 王栋 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(2): 92-101

基于虚拟参考站技术的滑坡高精度位移监测系统设计与实践

Design and practice of high precision landslide displacement monitoring system based on VRS

张鸣之, 湛兵, 赵文, 袁旭东, 李宏祥 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 54-59

2004—2018年北京市突发地质灾害时空分布特点和监测预警状况

Temporal-spatial distribution and monitoring and early warning of sudden geological disasters in Beijing during the period of 2004 to 2018

程素珍, 路璐, 翟淑花, 张长敏, 郝春燕, 任凯珍 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 38-46

自贡市地质灾害专群结合监测预警模式升级与实践

Upgrading and practice of early warning mode of geological disaster special group combination in Zigong City

杨江涛, 李波, 李伯宣, 罗兰 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 130-134



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202406004

何祥丽, 许冲, 黄远东. 北斗在地质灾害领域的应用现状与展望[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(4): 111-124.

HE Xiangli, XU Chong, HUANG Yuandong. Status and prospects of Beidou applications in geological disaster management[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(4): 111-124.

北斗在地质灾害领域的应用现状与展望

何祥丽^{1,2}, 许冲^{1,2}, 黄远东^{1,3}

(1. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085; 2. 复合链生自然灾害动力学应急管理部重点实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院大学应急管理科学与工程学院, 北京 100049)

摘要: 地质灾害分布广、影响大, 对人类生活及安全造成了严重的危害。作为中国自主研发、建设、运行的卫星导航系统, 北斗导航系统在地质灾害领域的应用逐渐展现出潜力和优势。目前, 北斗在地质灾害形变监测中的精度已与 GPS 相当, 可实现毫米级高精度观测, 在有遮挡的区域定位精度甚至优于 GPS; 其数据通信功能主要包括数据传输和数据处理两大方面, 具有实时性强、传输快捷、无通信盲区的优点, 在应急救援中可提供卫星通信、应急通信网建设、位置共享与监控、应急广播服务、远程医疗支持等。通过融合监测地表形变、地下水位、地下应力等相关参数的传感器, 或结合 InSAR 技术和光学遥感技术等, 北斗系统能够显著提高地质灾害监测预警和应急救援的及时性和准确性。例如, 北斗系统已成功应用于湖南常德石门滑坡、金沙江白格滑坡、京张和兰新铁路等铁路沿线及周边环境地质灾害形变监测预警等。虽然目前仍有观测数据积累不足、数据处理算法滞后等相关技术和机制性问题待解决, 但随着人工智能技术的不断发展, 北斗系统在地质灾害领域的应用将会更加广泛和智能化, 为防灾减灾救灾工作提供更有力的支持。

关键词: 北斗导航系统; 地质灾害; 监测预警; 应急救援; 精准高效

中图分类号: P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2025)04-0111-14

Status and prospects of Beidou applications in geological disaster management

HE Xiangli^{1,2}, XU Chong^{1,2}, HUANG Yuandong^{1,3}

(1. National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China; 2. Key Laboratory of Compound and Chained Natural Hazards Dynamics, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China; 3. School of Emergency Management Science and Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Geological disasters are widespread and pose significant threats to human life and safety. With advancements in science and technology and the continual development of national emergency management systems, satellite navigation technology has played an increasing vital role in geological disaster monitoring, early warning, and emergency response due to its global coverage and high-precision positioning capabilities. As a satellite navigation system independently developed, constructed, and operated by China, the Beidou navigation satellite system (BDS) has demonstrated growing potential and

收稿日期: 2024-06-04; 修订日期: 2024-07-17 投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077259); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目(2023-JBKY-57)

第一作者: 何祥丽(1991—), 女, 福建建瓯人, 构造地质学专业, 博士, 副研究员, 主要从事地质灾害与活动构造相关研究。

E-mail: hxlokd@163.com

通讯作者: 许冲(1982—), 男, 河南周口人, 地质工程专业, 博士, 研究员, 主要从事地质灾害机理与评估相关研究。

E-mail: xc11111111@126.com

advantages in its application in this field. Currently, BDS achieves millimeter-level accuracy in monitoring geological deformations, comparable to that of GPS. In obstructed environments, its positioning accuracy even surpasses GPS. Its data communication capabilities, including both data transmission and processing, offer advantages such as real-time responsiveness, rapid transfer, and comprehensive coverage without communication blind zones. In emergency rescues, BDS enables satellite communication, emergency communication network construction, location sharing and monitoring, emergency broadcasting services, and remote medical assistance. By integrating sensors for monitoring surface deformation, groundwater levels, underground stress, and other related parameters, or by combining InSAR and optical remote sensing technologies, BDS can significantly enhance the timeliness and precision of geological disaster monitoring, early warning, and emergency rescue. Notably, BDS has been successfully applied in early warning and monitoring efforts for the Shimen landslide in Changde (Hunan), the Baige landslide in the Jinsha River, and for deformation monitoring along major railways such as the Beijing-Zhangjiakou and Lanzhou-Xinjiang railways. Despite existing challenges, such as limited observational data and lagging data processing algorithms, the continued advancement of artificial intelligence technologies is expected to promote broader and more intelligent applications of BDS in geological disaster prevention, mitigation, and emergency response.

Keywords: Beidou navigation satellite system (BDS); geological disasters; monitoring and early warning; emergency rescue; precision and efficiency

0 引言

地质灾害是指地球内部或表面发生的、由地质因素造成的自然灾害^[1]。我国是地质灾害最为严重的国家之一^[2]。地质灾害具有频发性、群发性、突发性、毁灭性强以及影响时间长、范围广等特点,对人类生命财产安全造成严重威胁,也导致了一系列生态环境和社会经济问题^[2-3]。在经济社会不断发展以及全球变暖的背景下,人类工程活动不断加剧,强降雨等极端天气频繁发生,地质灾害防治工作面临着严峻的挑战^[4-5]。尤其,地质灾害常发生在地形复杂、构造活跃、地表植被覆盖度高的高山峡谷地区。这些地区地质灾害的监测预警和应急救援工作面临着成本高、成效低、难度大的问题,严重影响了防灾减灾救灾工作的开展。因此,先进的科学技术应用于地质灾害领域,进行地质灾害实时监测、准确预警和高效救援对防灾减灾救灾具有重要的意义。

在我国,随着科技水平与国家应急体系持续发展和完善,地理信息、卫星通信、遥感技术、云计算等新兴技术在地质灾害监测预警、应急救援和防治等领域的应用得到了广泛推广^[6-8],其中卫星导航技术由于其全球性覆盖、高精度定位等优势,在地质灾害领域发挥着越来越重要的作用^[9-12]。北斗卫星导航系统(BDS)作为我国自主研发、建设、运行的卫星导航系统,在地质灾害领域的应用也逐渐展现出潜力和优势^[13]。2003年12月15日,北斗一号建成并正式开通运行,向中国境内提供服务;2012年12月,北斗二号开始向亚太地区

提供服务;2020年7月31日,北斗三号正式建成开通并在全球提供服务。随着这二十多年的发展,北斗卫星导航系统提供的全天候的高精度定位、精准导航、统一授时、短报文通信等优质服务能力以及融合各类监测传感器的北斗新技术在地质灾害监测预警和应急救援中的应用也日益受到重视^[7,14-19],相关研究的发文量也随之增长(图1—2)。

地表形变是地震、火山、滑坡等自然灾害体发生灾变前最直观的前兆信息,也是地质灾害预警预报的主要依据,因此地质灾害监测最常通过监测地表变形或位移来实现^[20-24]。传统的简易观测、仪表观测、宏观观测、自动观测等监测方法要求工作人员定期到野外现场进行数据采集与分析,无法实时获取连续的地质数据,测量精度也有待提高^[7]。相比之下,近30a快速发展的全球卫星导航系统(GNSS)和干涉测量合成孔径雷达(InSAR)等空间大地测量观测技术为高精度地壳形变数据获取提供了技术支撑^[25-26]。早在20世纪90年代,以全球定位系统(GPS)为主的全球卫星导航系统在世界各地布设地壳运动和区域形变监测网^[27-28]。21世纪以来,随着北斗系统的建成和发展,中国大陆环境构造监测网络的260多个GNSS连续观测站在2015年已经开始全部接收北斗数据,北斗在地壳变形监测中的应用已成为必然趋势^[29]。目前,中国大陆构造环境监测网连续测站已经积累北斗数据近9a,有了一定的数据基础。研究表明通过融合GPS、InSAR等系统,采用GPS+BDS双模或多模算法可以有效提高形变解算精度,也

着 2020 年 7 月 31 日北斗三号系统正式开通,北斗卫星导航系统卫星数已达 50 余颗,其中中国区域内的可见卫星数可达 16 颗(<https://www.csno-tarc.cn/performance/number>),无论是在城市、农村还是偏远地区,北斗系统基本能够覆盖。通过多颗卫星的信号组合和差分校正等技术手段,北斗系统定位精度得到有效提升,伪距和载波测量精度已达到 GPS 同一水平,可实现高精度观测^[15]。并且,这些卫星以高速运行在地球轨道上,能够在短时间内实现位置的实时更新。由此可见,北斗系统能够满足地质灾害监测预警和应急救援在精度、时效性和空间范围上的需求,帮助监测人员迅速响应和处置突发灾害事件。相较于其他系统,北斗系统包括 5 颗地球静止轨道卫星,在我国区域有更好的卫星信号覆盖。空间精度因子(PDOP)是表征卫星与用户相对位置关系几何强度的参数。如果用户测距误差保持一定范围,PDOP 越大表示定位精度越差,PDOP 越小表示定位精度越高。从北斗空间精度因子分布图可看出北斗系统对我国境内定位精度相对更高,尤其在中国南方精度最高(<https://www.csno-tarc.cn/performance/pdop>),这符合我国地质灾害常发生在南方高山峡谷地区的实际情况。由此可见,北斗在复杂环境下地质灾害的形变监测中具有显著的优势^[42-43]。例如,广西壮族自治区地质环境监测站朱真等^[39]2020 年基于数字变频广播载波相位差分技术边缘计算技术融合全球卫星导航系统核心解析算法,研发了一套北斗高精度地质灾害监测系统,并完成了系统测试。该系统可实现毫米级精准测量和实时远程监测,快速计算海量数据和及时预警。同年,该系统被应用于广西梧州市宝石园北部不稳定斜坡体监测,根据监测的位移结果,表明边坡顶部前沿有下沉且向外侧蠕动的趋势,整个坡体向东南倾斜,由此给出了灾害防御建议。长安大学黄观文等^[41]研制了一套基于北斗云的新型滑坡实时监测系统,该系统包括北斗监测接收机、数据流管理软件和滑坡形变监测软件。通过对实测数据进行解算分析,这套系统能够实现水平和高程均优于 2~3 mm 的实时监测精度。

同时,北斗的定位导航功能在地质灾害应急救援中也发挥着至关重要的作用^[19,46]。目前,北斗可以对救援人员进行精准定位,也可以考虑实时交通状况、道路状况等因素。在地质灾害发生后,道路可能受阻或被损毁,北斗系统可以为救援人员提供高效精准的导航功能,帮助救援人员在复杂地形中沿着最佳路线安全快速地前往灾区。通过定位和导航功能,救援指挥中心还可快速调度救援人员和资源,有效组织应急救援行动。例

如,汶川地震发生后,北斗装备在抗震救灾中分别在实时监控定位、导航及信息服务、远程监测和灾情预警、公共应急信息服务等方面发挥的重要作用。据统计,北斗系统震后一个月期间累计为灾区提供卫星定位服务 164 万余次、短信服务 74 万余次^[47]。Hao 等^[46]依托北斗卫星技术,以数字地勘网格平台为支撑,实现对各移动节点路径和通信信息的实时监控以及与野外站和移动目标的通信,构建了基于北斗卫星导航系统的野外地质调查应急救援信息系统,并在自然条件恶劣、交通不便、信号差的西藏阿里地区进行了示范应用,取得了良好效果,为野外地质调查人员提供了安全保障,为应急救援提供了技术支撑。

1.2 数据通信

北斗卫星导航系统安全可靠,覆盖范围广,具有实时性强、传输快捷、无通信盲区的优点^[14],通过提供可靠的位置信息传输和实时数据处理能力提高了地质灾害监测预警和应急救援的及时性和准确性。通过分析总结,北斗的数据通信功能主要包括数据传输和数据处理两大方面(图 3)。在数据传输中包括位置信息传输、传感器数据传输、应急信息传输等。北斗系统提供全球覆盖的定位服务,可以将地质灾害监测设备获取的位置信息和传感器获取的数据(如地表形变、地下水位、地震数据等)实时传输到数据处理中心、预警中心或相关机构^[16,48],数据处理中心再对这些数据进行实时处理和分析,以识别地质灾害发生的可能性;北斗系统传输的数据可以与其他传感器数据进行融合,比如气象数据、地形数据等,以提高地质灾害预警的准确性和可靠性;一旦数据分析确认存在地质灾害风险,数据处理中心将数据结果反馈给预警和应急部门,再利用北斗系统发布预警信息,包括地质灾害类型、可能影响范围、预

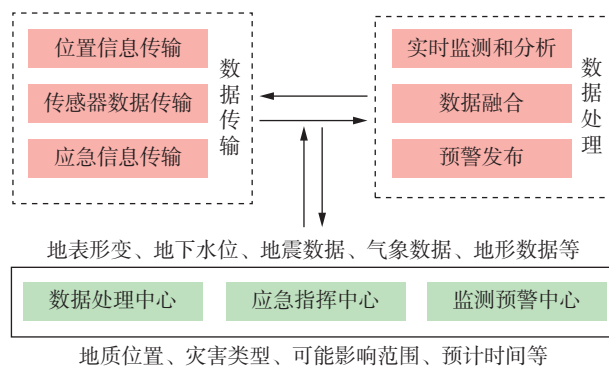


图 3 北斗在地质灾害领域中的数据通信功能组成图

Fig. 3 Functional structure of Beidou data communication function in geological disaster applications

计时间等,通知相关部门和公众采取相应的防范措施(图3)。

早期,基于“北斗一号”,中国地质环境监测院与清华大学针对地面沉降、滑坡等地质灾害研制的地质灾害实时监测系统,可实现有效管理各类地质监测数据与信息、自动采集监测数据、实时传输与存储、快速分析与处理^[48-49]。该系统工作流程是:首先由野外地质灾害监测站采集降雨量、地表位移、地下水位、深部表形等数据,然后北斗卫星导航系统将数据发送至地质灾害监测中心,监测中心将处理分析后的反馈信息再通过北斗系统发送到野外系统,实现远程控制和指挥,其中北斗卫星系统为地质灾害监测系统提供了通信链路。Tao等^[50]开发了一种远程智能滑坡监测系统,该系统分为传感层、网络层和应用层。传感层将传感器采集的监测数据传输至通用分组无线业务(general packet radio service, GPRS)与北斗一体化设备,实现了GPRS与北斗的双通道通信。通讯故障时可自动切换通讯模式,保证数据传输不间断;网络层云平台将接收到的数据传输至云服务和云数据库,系统可以对获取的信息进行管理和分析,生成动态曲线进行预警分析,并直观地展示预警结果,当监测数据超过预警临界点时,可自动发出预警提示信息。应用层相关人员可以通过电子邮件、网页或智能手机获取相关数据,快速动态判断滑坡的稳定状态,进一步增强预警的及时性。该系统被应用于三峡库区巴东县周家湾滑坡监测,监测人员通过智能手机及时定位和检查变形区域的失效特征,提高了监测预警时效性。另外,2010年甘肃舟曲特大泥石流发生后,该地区不仅部署了监测系统,中国气象局还为舟曲县支援了两台可连接北斗卫星信号的便携式移动气象站。在网络信号不通时,可以借助北斗卫星进行气象要素传输,进一步提高舟曲气象应急保障能力(http://www.tibet.cn/cn/index/zqdt/202008/t20200805_6831388.html)。

另外,北斗系统在地质灾害应急救援中提供了可靠的通信保障^[51-52],具体措施包括卫星通信、应急通信网建设、位置共享与监控、应急广播服务、远程医疗支持等(图4)。其中,卫星通信服务可以实现灾区内外的通信连接,即使地面基础设施受损或通信网络中断,救援人员仍可通过北斗卫星进行通信,包括语音通话、短信、数据传输等。在灾后救援期间,可临时部署北斗通信终端设备,建立灾区内的应急通信网,确保救援指挥中心与救援人员之间、救援人员之间的及时通讯。利用北斗系统提供的通信服务,救援指挥中心可以迅速发布救援任务、指挥调度救援人员、协调资源,保障救援

行动的有序进行;还可以实时了解救援人员的位置信息,并对其进行监控,保障救援人员的安全,提高救援行动的协调性和效率。另外,北斗系统还可提供应急广播服务,向受灾群众广播救援指南、安全提示、灾情通报等信息,帮助受灾群众及时采取应对措施。在灾区建立远程医疗支持系统,通过北斗卫星通信传输患者的医疗信息、影像资料等,实现远程会诊和医疗支援,提高受灾人员的治愈率和生存率。

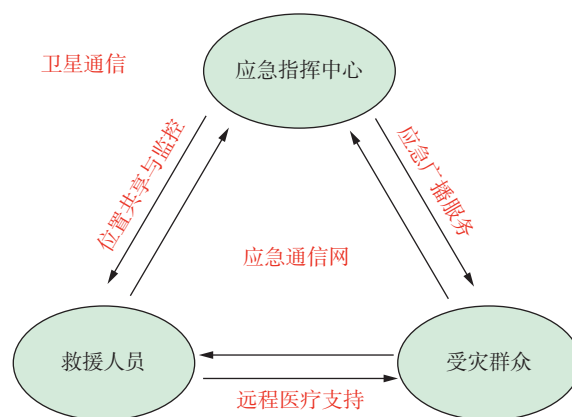


图4 北斗系统在地质灾害应急救援中的通信保障措施
Fig. 4 Communication support provided by the Beidou system in geological disaster emergency response

北京空间信息中继传输技术研究中心刘崇伟和费立刚^[52]构想并验证了基于TDRSS(tracking and data relay satellite system)应用的全球远程信息传输系统,该系统组成要素除了TDRSS卫星网络、空天信息获取平台、地面通信网和地面联合指挥中心外,还包括“北斗”卫星时空网络。“北斗”卫星时空网络可提供区域目标的快速定位、位置报告和短报文通信服务,其测速和授时服务分别可达0.2 m/s级和10 ns级。王尔申等^[19]研发的北斗时空信息传输压缩编码方法和基于北斗/5G的信息优化处理技术,能够降低短报文单次通信内容所需字长,提高通信效率,有助于救援终端与指挥中心处理的信息准确可靠。

1.3 融合多源传感器/数据

目前,融合卫星导航技术与多元传感技术已被广泛应用,同时也是地质灾害监测预警研究的热点方向^[53-54]。地质灾害监测一般需要多种传感器获取地表形变、地下水位、地下应力、地震等数据,通过分析这些数据,可以提前预警,减少地质灾害的发生^[55]。北斗系统通过其全球导航卫星系统提供的定位、导航和时间服务,尤其是毫米级高精度定位服务,融合各类监测传感器,可构建地质灾害综合监测系统,有效提高监测预警的准确性

和时效性^[7, 56-57]。例如,融合卫星遥感技术对地表的微小形变进行监测,可以预测地震、滑坡等地质灾害发生的可能性^[58];结合地下水位监测传感器对地下水位的变化情况实时监测,可以预测地下水位上升或下降对地面塌陷、地裂缝等地质灾害的影响;结合地下应力传感器获取地下岩石的应力信息,可以实时监测地下岩石的应力状态;融合地震监测传感器数据实时监测地震的发生

位置和强度,减少地震灾害造成的损失^[33]。刘立等^[42]表明融合具有高时间分辨率特征的北斗定位导航系统、InSAR 技术和高空间分辨率的光学遥感技术,能够获取高时空分辨率的地表形变信息、地表覆盖变化信息,并分析二者的耦合关系,建立地质灾害形变模型,动态预计地质灾害对地表的影响范围,减少对周边居民及环境的影响,其技术流程见图 5。

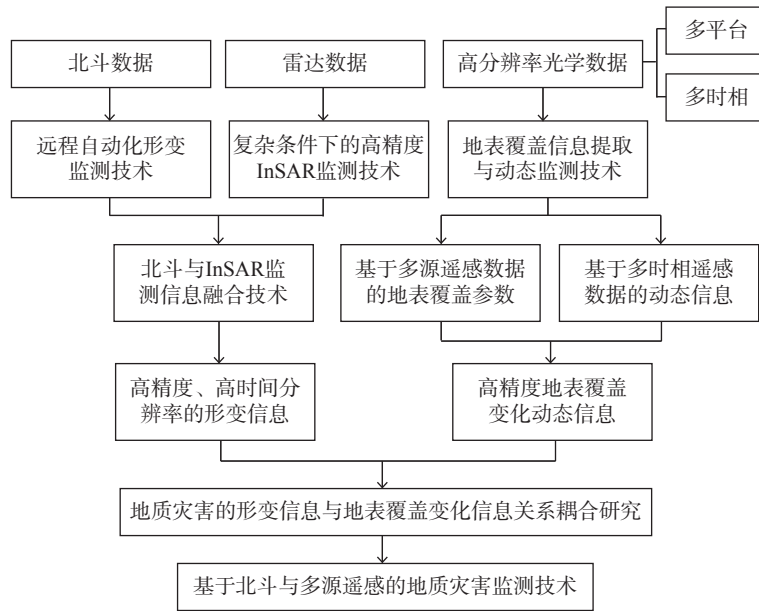


图 5 北斗与多源数据融合应用技术路线图^[42]

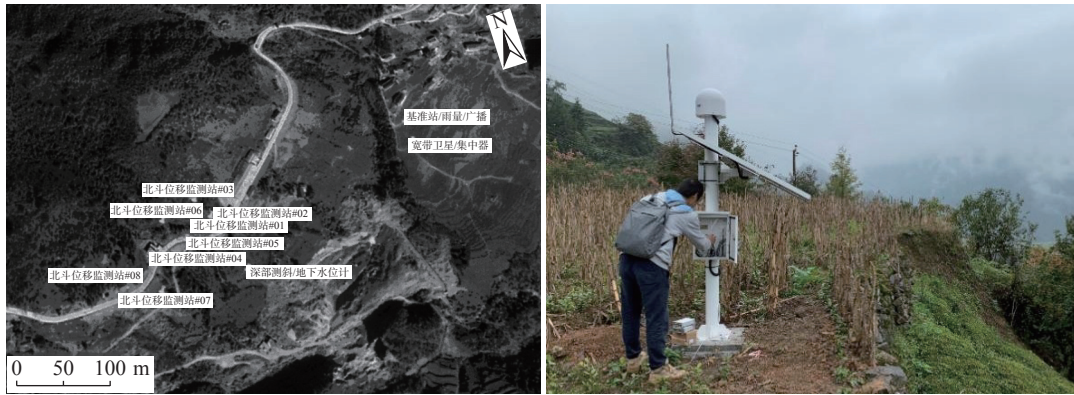
Fig. 5 Technology roadmap for integrating Beidou with multi-source data in disaster monitoring

其中,由于 InSAR 技术能够缩短观测周期、扩大空间范围和提高监测精度,北斗系统则在实时定位和数据传输方面具有重要优势,因此,北斗+InSAR 技术具有大范围、全天时、全天候等优点,是地质灾害监测预警的重要手段和研究热点,具有广泛的应用前景^[42, 57]。北斗与 InSAR 的结合分为两个方面。一方面,通过 InSAR 技术对大范围变形及地质灾害隐患进行排查,指导北斗定位设备布设,而北斗技术可对 InSAR 技术排查出的高风险点进行连续实时的监测预警,如此结合可有效弥补表面变形监测的短板。另一方面,区域内的北斗设备可对 InSAR 数据进行精确的几何定位或地理编码,且北斗获取的三维坐标作为控制资料可精确校正由 InSAR 处理得到的变形分布图,以消除卫星轨道参数的不确定性和其他系统性的误差。由此,北斗+InSAR 技术被广泛应用于多类型地物变形监测领域,如大坝形变、滑坡形变、地面沉降和震后形变等^[57]。这样非接触式的测量方式可在安全距离内获得危险区域的形变数据,且可采集大面积区域形变信息和亚毫米精度的定点

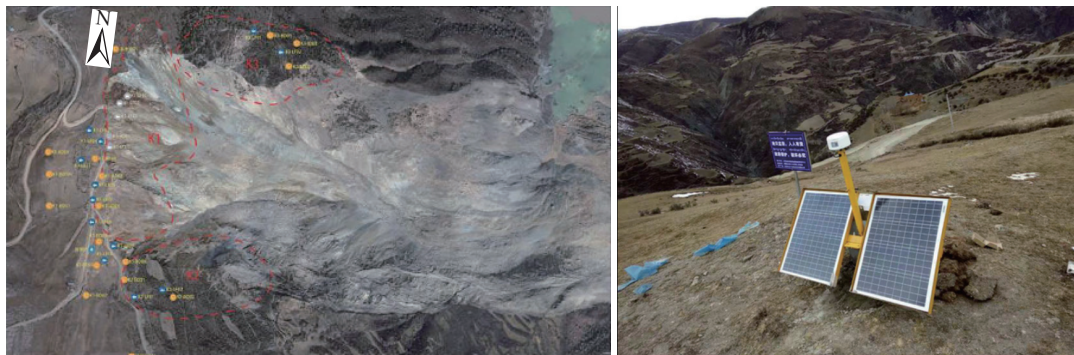
目标形变信息,更有助于灾害的预测,是对常规监测手段的有效补充。

2 典型应用案例

湖南省自然资源事务中心联合北斗微芯公司基于北斗高精度实时地质灾害监测预警系统精准预警 2020 年 7 月 6 日湖南常德石门滑坡地质灾害^[58-59]。该滑坡属于渐变型滑坡,经历了初始变形、等速变形、加速变形 3 阶段的演化过程^[60],于 2019 年 8 月由常德市自然资源和规划局勘察后被重点监测。湖南北斗微芯产业发展的指导下,对该隐患点布设地质灾害监测专业设备等,见图 6(a),包括地下水位计、地下测斜仪、雨量站、基准站和北斗位移监测站以及通信设施。基于监测数据(水平位移、深部位移、地表高程、地下水位及降水量等),建立地质灾害预警评估模型和险情上报机制,实现自动化监测预警。2020 年进入汛期以来,北斗高精度地质灾害监测预警系统监测到深部位移数据异常、多



(a) 湖南常德石门滑坡地质灾害监测点布置和监测设备^[58-59]



(b) 金沙江白格滑坡监测点布置及监测设备



(c) 铁路沿线地质灾害监测点布置及监测设备^[7]



(d) 低功耗高精度多参数自适应北斗/GNSS监测终端和无人机部署抛投^[43]

图 6 北斗在典型地质灾害案例中的应用

Fig. 6 Application of the Beidou system in typical geological disaster cases

个站点水平位移突然加速,综合当天地下水位、雨量计数据等综合数据,并对比以往监测数据,判断该隐患点有极大可能发生滑坡,于 2020 年 7 月 6 日 14 时发布临滑预警,并报告常德市自然资源和规划局。2020 年 7 月 6 日 17 时 10 分,该隐患点确实发生大规模滑坡,体积达 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$,因预警及时和相关部门处置妥当,采取对现场道路进行交通管制、组织人员疏散等防范措施,这次地质灾害未造成人员伤亡。

2018 年 10 月 11 日和 11 月 3 日,西藏自治区昌都市江达县波罗乡白格村先后发生特大山体滑坡,此后该滑坡两侧及后缘仍在持续变形,渐有扩大趋势,存在垮塌堵江风险^[61]。受自然资源部和成都地调中心委托,深圳北斗云信息技术有限公司工作人员联合专家组,在灾害发生后,第一时间携带专业监测设备徒步进入灾害体,安装了包括 10 套裂缝监测仪器、8 套地表位移监测仪器、3 套北斗短报文等在内的 21 套专业监测设备,见图 6(b)。这些设备实时监测滑坡体的情况,并将数据传回前沿指挥部,不仅为抢险救灾提供了重要数据,在灾害后续形变监测中也发挥重要作用。至今,金沙江白格滑坡监测系统提供 200 多份监测数据报告,曾多次成功预警局部滑塌(<https://www.northdoo.com/nd.jsp?id=342>)。此外,深圳北斗云还成功监测预警 2018 年 2 月 19 日陕西周至 G108 国道黑河水库崩塌。小型化实时北斗监测技术装备和毫米级实时监测预警云平台被成功应用于甘肃黑方台滑坡实时监测预警^[62]。

中铁第五勘察设计院集团有限公司北斗导航装备与时空信息技术铁路行业工程研究中心将北斗系统与多元传感器相融合,并结合了物联网等技术,开发了一套北斗地质灾害综合监测预警平台。通过在铁路沿线及其周围的地质灾害隐患区域内布设北斗监测终端,对于铁路基础设施及周边环境水平和竖向位移、倾斜程度等进行自动化、全天候、高精度(毫米级)的实时监测,构建了适用于铁路沿线的安全监测预警体系^[7],见图 6(c)。目前,该平台不仅成功应用于京张高铁、兰新高铁、赤大白铁路等多条铁路^[7],还应用于油气管网、水利基础设施的地质灾害监测。

另外,中国地质环境监测院、武汉大学、长安大学、中国测绘科学研究院、深圳市北斗云信息技术有限公司等单位组成的研发团队依托国家重点研发计划“重大自然灾害防控与公共安全”重点专项项目“复杂山区地质灾害监测预警北斗集成系统研发”(2021YFC3000500),通过开展芯片模组、无人机抛投,见图 6(d),精准定位、智能终端和预警方法等方面的全面攻关,研制了高

精度、多参数、低功耗、自适应新一代北斗/GNSS 智能终端,见图 6(d),及集成系统,已基本完成实验室验证,即将开展野外应用,以期解决复杂山区地质灾害监测预警实际工作中精准定位难、数据传输难、可靠预警难等问题,促进地质灾害监测预警从“人防”向“人防+技防”新模式转变^[43]。

3 存在问题与研究展望

随着北斗三号组网完成,北斗系统导航定位能力不断增强,相较于其他系统,北斗系统在我国区域有更好的卫星信号覆盖,特别是在有遮挡的区域定位精度甚至优于 GPS。并且,地质灾害主要分布在高山峡谷或山地丘陵地区和南方多降雨地区,例如四川、云南、贵州、新疆等地区,这些地区自然环境大多较为恶劣,常见云层遮挡现象,由此北斗在地质灾害领域的应用具有更大的优势和潜力。即便如此,相比于成熟的 GPS 在各领域的应用,北斗系统在地质灾害防灾减灾救灾中的应用还相对薄弱,仍有许多不足:

(1) 设备系统有待升级

北斗一号通信终端存在体积大、功耗高、设备老化严重等问题,已经逐渐无法满足灾害应急通信保障需求,现有设备也无法满足复杂环境地区使用需求。并且,目前基于北斗二号卫星导航系统的应急管理信息化建设,主要功能为灾情信息采集与发布、应急救援指挥调度,无灾害监测预警功能,已不适用于目前应急管理部运行管理模式。北斗系统在地质灾害领域的实际应用中仍需根据北斗三号的服务升级改造监测预警终端、救援设备、应急系统等。

(2) 观测数据积累不足

虽然自 2015 年以来,中国大陆构造环境监测网络 260 余个 GNSS 连续观测站已经全部接收北斗数据,中国地震科学实验场的部分测站也已经积累了 2 a 以上的北斗数据,但区域内 GNSS 测站对北斗数据的接收能力远不如 GPS,数据接收时间也不充足。中国地震科学实验场区域内能够接收 GPS 数据的测站数量是北斗数据测站的 4 倍,密集程度远超北斗测站,并且部分测站接收的北斗信号不完整^[63-64]。因此,需不断升级更新接收设备,使得更多测站能记录完整的北斗数据。

(3) 数据处理算法滞后

GNSS 高精度处理软件虽然大多已经可以兼容解算北斗系统数据,但实际上软件相关模型(如中天线相位中心和太阳气压误差改正模型)及 ITRF 参考框架都与 GPS 有更好的适配性,对于北斗系统还不够完善。

整体而言,由于北斗系统轨道卫星和观测数据信号不同,相较于GPS,北斗系统不仅解算软件相对滞后,其数据解算算法也不够成熟,包括数据实时处理算法和事后高精度数据处理算法以及卫星轨道、周跳探测修复、钟差模型等都有待进一步完善^[63-64]。因此,相关数据处理算法及软件系统的开发迫在眉睫,这是推进北斗系统在地质灾害高精度监测领域中广泛应用的重要举措。

(4) 定位精度有待提升

北斗系统已经在定位技术方面取得了很大的进步,设计精度已经与GPS相当,但实际使用中受各种因素影响,当前各机构发布的钟差产品、精密轨道的精度均略弱于GPS。除了完善上述天线相位中心改正、经验太阳光压模型和参考框架外,还可基于北斗星基增强系统提高导航定位精度^[19]。此外,还可以通过多模态定位技术、差分定位技术、增强定位算法、地面增强系统等提升定位精度。多模态定位技术是利用多种定位技术,如北斗卫星定位、GPS、GLONASS、Galileo等卫星导航系统的组合,以及惯性导航、地标辅助定位等技术,提高定位精度和鲁棒性,可以更好地应对这些地质灾害区域地形复杂、信号遮挡等情况。差分定位技术通过建立基准站网络,实现对移动终端的差分校正,有效抵消大气延迟、多径效应等误差,提高位置测量的准确性。研发和应用增强定位算法,如扩展卡尔曼滤波(EKF)、粒子滤波(PF)、卡尔曼滤波与粒子滤波融合(KF-PF Fusion)等,以提高对信号干扰和噪声的抑制能力,进一步提升定位精度。在灾区部署地面增强系统,能够提供更密集、更稳定的信号覆盖,利用地面基准站的观测数据对卫星信号进行实时校正,有助于提高定位的可靠性和精度。目前多个全国范围的北斗地基增强站网系统已经建成,相关区域级、行业级北斗地基增强系统也在有序建设。另外,借助人工智能、机器学习等先进技术,对北斗系统进行持续改进,可进一步提升其在地质灾害领域的定位精度和稳定性。

(5) 数据传输和处理能力有限

在应对地质灾害时,特别是需要实时监测和及时响应的情况下,数据传输和处理的能力对于救援行动的效率和成败至关重要。北斗在地质灾害领域的数据传输和处理能力目前还存在一定的局限性。如北斗系统的数据传输带宽相对较小,无法传输大量的数据或高清晰度的图像和视频等信息,这在地质灾害监测和救援中可能限制了对实时情况的全面了解。数据时效性还有待提高,数据传输速率较慢可能导致数据在传输过程中的延迟,降低了对地质灾害发展态势的实时监测能力。北

斗系统通常不直接进行数据处理,而是将数据传输到地面站或数据中心进行处理。但是,地面站或数据中心的处理能力可能有限,无法满足对大规模数据进行高效处理的需求。可采用高性能的计算设备和算法来强化地面站和数据中心的数据处理能力。由于地质灾害监测和救援涉及敏感的地理信息数据,需加强对数据安全性和隐私保护的管理和控制,采取加密传输、访问控制等技术手段,保障数据的安全性和完整性。

(6) 预警模型和救援决策机制尚不完善

尽管北斗系统在地质灾害领域已经发挥了重要作用,但在预警模型和救援决策机制方面还有改进空间。目前的地质灾害预警模型在精度和覆盖范围上可能还存在一定局限性,需要结合多种传感器数据和气象地质信息,通过深度学习、机器学习等技术不断优化和提升精度,并且需要考虑更广泛的地质灾害类型和地区^[65]。地质灾害的发生往往是突发性的,建立实时数据监测和预警机制至关重要,预警模型需要更快速地响应变化,实现对地质灾害的早期预警,提高应对突发事件的能力。地质灾害发生后,救援资源的合理调度和优化分配对于救援行动的成功至关重要。因此,在救援决策方面,需要借助数据分析、人工智能等先进技术手段建立智能决策支持系统,优化应急响应和资源调度机制,帮助救援指挥中心和救援人员做出更加科学、准确的决策,提高救援效率和减少灾害损失。另外,地质灾害救援需要地质、气象、民政、医疗等多个部门协同合作,建立跨部门的信息共享和协同工作机制,是提高救援效率和协同应对地质灾害的重要举措。总的来说,需要持续加强技术创新和系统优化,不断提升预警模型的精度和覆盖范围,建立更为智能化和高效的救援决策机制,以应对地质灾害带来的挑战。

(7) 智能化应用不成熟

随着云计算、大数据、物联网等技术的不断发展,尤其是人工智能、云宇宙等技术的突破,利用北斗融合新一代信息化技术的地质灾害智能感知、监测预警以及应急指挥救援等方面有待进一步发展。结合机器学习和深度学习等人工智能技术,北斗系统在地质灾害监测预警中可实现对大数据和历史监测数据进行智能化处理和建模^[50]。首先整合利用北斗系统和其他地质监测传感器获取的地表形变、地下水位、地震活动等数据和气象、地形地貌等外部数据,以建立更全面的地质灾害监测数据集。然后对数据进行特征提取与选择,挖掘出与地质灾害相关的特征,如地表形变的变化速率、地下水位的波动情况、地震活动的频率等。再利用机器

学习算法和特征工程方法,对提取的特征进行筛选和优化,以提高模型的性能和泛化能力。基于收集到的数据和提取的特征,采用各种机器学习算法或深度学习技术,如支持向量机、随机森林、卷积神经网络、循环神经网络等,建立地质灾害智能监测预警模型,以实现实时监测和智能分析。另外,利用北斗系统传输的实时数据,对灾区情况进行评估和监测,建立智能化的指挥调度系统,智能地指挥调度救援行动、资源配置和路径规划,为救援指挥中心和救援人员提供决策支持,提高救援行动的效率和成功率。

此外,可增加北斗地质监测传感器的密度和覆盖范围,构建更为密集的传感器网络,这样可以实现对更广泛地区的地质灾害监测,进而扩展监测预警范围。加强与其他国家和地区的卫星导航系统进行合作,共享监测数据和预警信息,扩展地质灾害监测预警的范围,实现对跨国地质灾害的预警和应对。随着北斗导航系统的不断完善和发展,其在地质灾害监测预警和应急救援等方面的应用将会更加广泛和深入,实现高精度、高可靠的连续监测和高效救援,助力防灾减灾救灾工作的开展。

4 结论

(1)随着北斗三号全球卫星导航系统的开通,北斗系统在地质灾害领域中的应用不断发展,尤其在观测精度方面,已达毫米级(与 GPS 相当),在有遮挡的区域甚至优于 GPS;在数据通信方面,具有实时性强、传输快捷、无通信盲区的优点。另外,北斗与地表形变、地下水位、地下应力等传感器或 InSAR 和光学遥感等技术的融合也较为成熟。这些方面的应用显著提高了地质灾害监测预警和应急救援的及时性和准确性。典型应用案例包括湖南常德石门滑坡、金沙江白格滑坡、京张和兰新铁路等铁路沿线及周边环境地质灾害等。

(2)虽然北斗系统在我国区域,特别是在南方高山峡谷地区和多云层降雨地区的应用具有更大的优势和潜力,但相比于成熟的 GPS 在各领域的应用,北斗系统在地质灾害防灾减灾救灾中的应用还存在一些不足,如设备系统有待升级、观测数据积累不足、数据处理算法滞后、定位精度有待提升、数据传输和处理能力有限、预警模型和救援决策机制尚不完善、智能化应用不成熟等。未来,随着北斗系统的不断完善,以及北斗地质监测传感器的加密,和共享合作机制的发展,北斗在地质灾害领域中的应用将会更加广泛和深入,实现高精度、高效率的智能监测预警和应急救援。

(3)本文的研究系统总结了北斗在地质灾害领域中的应用现状和不足,不仅有助于提升地质灾害预警和应急救援的能力,还有助于识别当前技术存在的瓶颈和挑战,推动北斗技术的改进和优化,进一步挖掘其应用潜力,为防灾减灾工作提供更多支持。

参考文献(References):

- [1] 刘守全,刘锡清,王圣洁,等.南海灾害地质类型及分区[J].中国地质灾害与防治学报,2000,11(4):42-47. [LIU Shouquan, LIU Xiqing, WANG Shengjie, et al. Kinds of hazardous geology and division in South China Sea [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, 11(4): 42-47. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 殷跃平.中国地质灾害减灾战略初步研究[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(2):1-8. [YIN Yueping. Initial study on the hazard-relief strategy of geological hazard in China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(2): 1-8. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 刘传正,陈春利.中国地质灾害防治成效与问题对策[J].工程地质学报,2020,28(2):375-383. [LIU Chuazheng, CHEN Chunli. Achievements and countermeasures in risk reduction of geological disasters in China [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 375-383. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 黄润秋.20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩石力学与工程学报,2007,26(3):433-454. [HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-454. (in Chinese with English abstract)]
- [5] TANG Huiming, 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.
- [6] 徐靓,程刚,朱鸿鹄.基于空天地内一体化的滑坡监测技术研究[J].激光与光电子学进展,2021,58(9):98-111. [XU Liang, CHENG Gang, ZHU Honghu. Research review of landslide monitoring methods based on integration of space-air-ground-interior [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 98-111. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 姜慧.基于北斗的地质灾害综合监测技术应用[J].卫星应用,2023(8):49-54. [JIANG Hui. Application of comprehensive geological disaster monitoring technology based on Beidou [J]. Satellite Application, 2023(8): 49-54. (in Chinese with English abstract)]

- [8] 武生辉,全德富,苏爱军,等.新铺下二台滑坡变形机制及中长期预报模型 [J] .地质科技通报, 2022, 41(6): 35 - 44. [WU Shenghui, TONG Defu, SU Aijun, et al. Deformation mechanism and medium- and long-term landslide prediction model of Xinpu Xia'ertai landslide [J] . Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 35 - 44. (in Chinese with English abstract)]
- [9] LIAN Xugang, LI Zoujun, YUAN Hongyan, et al. Determination of the stability of high-steep slopes by global navigation satellite system (GNSS) real-time monitoring in long wall mining [J] . *Applied Sciences*, 2020, 10(6): 1952.
- [10] 郭倩倩,刘诗云,潘伟锋.GNSS软件在地质灾害监测中的精度分析及思考 [J] .测绘与空间地理信息, 2023, 46(3): 194 - 197. [GUO Qianqian, LIU Shiyun, PAN Weifeng. Accuracy analysis and thoughts on GNSS software in geological disaster monitoring [J] . *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2023, 46(3): 194 - 197. (in Chinese with English abstract)]
- [11] ZHOU Xin, ZHANG Shuangcheng, ZHANG Qin, et al. Research of deformation and soil moisture in loess landslide simultaneous retrieved with ground-based GNSS [J] . *Remote Sensing*, 2022, 14(22): 5687.
- [12] 刘那巍,蔡华,蒲德祥,等.基于 CORS 基准站的 GNSS 滑坡地质灾害监测数据处理策略分析 [J] . *全球定位系统*, 2022, 47(2): 7 - 12. [LIU Xingwei, CAI Hua, PU Dexiang, et al. Analysis of GNSS landslide geological hazard monitoring data processing strategy based on CORS reference station [J] . *GNSS World of China*, 2022, 47(2): 7 - 12. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张同伟,李凌琪.基于北斗系统的地质灾害监测系统建设 [J] .电气技术, 2021, 22(1): 99 - 103. [ZHANG Tongwei, LI Lingying. Construction of geological disaster monitoring system based on Beidou system [J] . *Electrical Engineering*, 2021, 22(1): 99 - 103. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 温静,汪大明,孟月玥,等.北斗卫星导航系统在地质调查领域应用综述 [J] . *地质力学学报*, 2012, 18(3): 213 - 223. [WEN Jing, WANG Daming, MENG Yueyue, et al. Application of Beidou navigation satellite system to geological survey [J] . *Journal of Geomechanics*, 2012, 18(3): 213 - 223. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 杨元喜,李金龙,王爱兵,等.北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估 [J] . *中国科学:地球科学*, 2014, 44(1): 72 - 81. [YANG Yuanxi, LI Jinlong, WANG Aibing, et al. Preliminary evaluation of basic navigation and positioning performance of Beidou regional satellite navigation system [J] . *Scientia Sinica (Terrae)*, 2014, 44(1): 72 - 81. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 罗腾,白征东,朱永辉.新设计:基于北斗卫星系统的地质灾害监测系统软件设计与实现 [J] . *卫星与网络*, 2010(6): 32 - 34. [LUO Teng, BAI Zhengdong, ZHU Yonghui. New design: Software design and implementation of geological disaster monitoring system based on Beidou satellite system [J] . *Satellite & Network*, 2010(6): 32 - 34. (in Chinese)]
- [17] 王利,张勤,范丽红,等.北斗/GPS融合静态相对定位用于高精度地面沉降监测的试验与结果分析 [J] . *工程地质学报*, 2015, 23(1): 119 - 125. [WANG Li, ZHANG Qin, FAN Lihong, et al. Experiment and results of high precision land subsidence monitoring using fused BDS/GPS data and static relative positioning [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(1): 119 - 125. (in Chinese with English abstract)]
- [18] HAN Junqiang, TU Rui, LU Xiaochun, et al. Analysis of BDS/GPS deformation monitoring for the lake sarex dam [J] . *Remote Sensing*, 2023, 15(19): 4773.
- [19] 王尔申,舒皖森,刘云天,等.基于北斗/5G的航空应急救援信息优化处理技术研究 [J] . *电子测量技术*, 2021, 44(24): 8 - 13. [WANG Ershen, SHU Wansen, LIU Yuntian, et al. Research on optimization processing technology of aviation emergency rescue information based on BDS/5G [J] . *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(24): 8 - 13. (in Chinese with English abstract)]
- [20] LIN Chen, WU Guanye, FENG Xiaomin, et al. Application of multi-system combination precise point positioning in landslide monitoring [J] . *Applied Sciences*, 2021, 11(18): 8378.
- [21] LI Jinchao, GAO Fei, LU Jiaguo, et al. Deformation monitoring and prediction for residential areas in the Panji mining area based on an InSAR time series analysis and the GM-SVR model [J] . *Open Geosciences*, 11(1): 738 - 749.
- [22] WEN Ningling, ZENG Fanru, DAI Keren, et al. Evaluating and analyzing the potential of the Gaofen-3 SAR satellite for landslide monitoring [J] . *Remote Sensing*, 2022, 14(17): 4425.
- [23] LIU Youfeng, YANG Honglei, WANG Shizheng, et al. Monitoring and stability analysis of the deformation in the woda landslide area in Tibet, China by the DS-InSAR method [J] . *Remote Sensing*, 2022, 14(3): 532.
- [24] 王子,王栋,姜帅,等.西气东输管道工程陕西岭湾村滑坡变形特征及成因机制分析 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(3): 8 - 19. [WANG Zi, WANG Dong, JIANG Shuai, et al. Analysis on deformation mechanism of the Lingwan Village landslide in Shaanxi Province section of the West-East Gas Pipeline Project [J] . *The Chinese Journal of*

- Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 8 - 19. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 张伟, 陈宏, 纪成亮, 等. 基于升降轨 InSAR 数据的高山峡谷区滑坡易发性评价 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(2): 94 - 103. [ZHANG Wei, CHEN Hong, JI Chengliang, et al. Landslide susceptibility assessment in the alpine and canyon areas based on ascending and descending InSAR data [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(2): 94 - 103. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 董佳慧, 牛瑞卿, 亓梦茹, 等. InSAR 技术和孕灾背景指标相结合的地灾隐患识别 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 187 - 196. [DONG Jiahui, NIU Ruiqing, QI Mengru, et al. Identification of geological hazards based on the combination of InSAR technology and disaster background indicators [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 187 - 196. (in Chinese with English abstract)]
- [27] BOCK Y, AGNEW D C, FANG Peng, et al. Detection of crustal deformation from the Landers earthquake sequence using continuous geodetic measurements [J]. Nature, 1993, 361(6410): 337 - 340.
- [28] BEUTLER G, ROTHACHER M, SCHAEER S, et al. The international GPS service (IGS): An interdisciplinary service in support of earth sciences [J]. Advances in Space Research, 1999, 23(4): 631 - 653.
- [29] 高志钰, 郭进义, 刘杰. 北斗在地壳形变监测中的应用进展 [J]. 测绘通报, 2022(3): 32 - 35. [GAO Zhiyu, GUO Jinyi, LIU Jie. Application progress of BDS in monitoring crustal deformation [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(3): 32 - 35. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 叶世榕, 赵乐文, 陈德忠, 等. 基于北斗三频的实时变形监测数据处理 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(6): 722 - 728. [YE Shirong, ZHAO Lewen, CHEN Dezhong, et al. Real-time deformation monitoring data processing based on BDS triple-frequency observations [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(6): 722 - 728. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 郭树人, 蔡洪亮, 孟轶男, 等. 北斗三号导航定位技术体制与服务性能 [J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 810 - 821. [GUO Shuren, CAI Hongliang, MENG Yinan, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7): 810 - 821. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 柴海山, 陈克杰, 魏国光, 等. 北斗三号与超高频 GNSS 同震形变监测: 以 2021 年青海玛多 M_w 7.4 地震为例 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(6): 946 - 954. [CHAI Haishan, CHEN Kejie, WEI Guoguang, et al. Co-seismic deformation monitoring using BDS-3 and ultra-high rate GNSS: A case study of the 2021 Maduo M_w 7.4 earthquake [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(6): 946 - 954. (in Chinese with English abstract)]
- [33] LI Xingxing, ZHENG Kai, LI Xin, et al. Real-time capturing of seismic waveforms using high-rate BDS, GPS and GLONASS observations: The 2017 M_w 6.5 Jiuzhaigou earthquake in China [J]. GPS Solutions, 2018, 23(1): 17.
- [34] ZANG Jianfei, XU Caijun, LI Xingxing. Scaling earthquake magnitude in real time with high-rate GNSS peak ground displacement from variometric approach [J]. GPS Solutions, 2020, 24(4): 101.
- [35] WANG Haonan, DAI Wujiao, YU Wenkun. BDS/GPS multi-baseline relative positioning for deformation monitoring [J]. Remote Sensing, 2022, 14(16): 3884.
- [36] HUANG Guanwu, DU Yuan, MENG Lumin, et al. Application performance analysis of three GNSS precise positioning technology in landslide monitoring [M]. //China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2017 Proceedings: Volume I. Singapore: Springer Singapore, 2017: 139 - 150.
- [37] ROBERTS G W, TANG Xu. The use of PSD analysis on BeiDou and GPS 10 Hz dynamic data for change detection [J]. Advances in Space Research, 2017, 59(11): 2794 - 2808.
- [38] XI Ruijie, CHEN Hua, MENG Xiaolin, et al. Reliable dynamic monitoring of bridges with integrated GPS and Beidou [J]. Journal of Surveying Engineering, 2018, 144(4): 04018008.
- [39] 朱真, 江思义, 刘小明, 等. 基于广播 RTK 边缘计算的北斗高精度地质灾害监测系统及应用分析 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 176 - 183. [ZHU Zhen, JIANG Siyi, LIU Xiaoming, et al. The Beidou high precision geological disaster monitoring system based on RTK edge calculation and its application analysis [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 176 - 183. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 张鸣之, 湛兵, 赵文祎, 等. 基于虚拟参考站技术的滑坡高精度位移监测系统设计与实践 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(6): 54 - 59. [ZHANG Mingzhi, ZHAN Bing, ZHAO Wenyi, et al. Design and practice of high precision landslide displacement monitoring system based on VRS [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 54 - 59. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 黄观文, 黄观武, 杜源, 等. 一种基于北斗云的低成本滑坡实时监测系统 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(4): 1008 - 1016. [HUANG Guanwen, HUANG Guanwu, DU

- Yuan, et al. A lowcost real-time monitoring system for landslide deformaion with Beidou cloud [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(4): 1008 – 1016. (in Chinese with English abstract)]
- [42] 刘立, 李长安, 高俊华, 等. 基于北斗与 InSAR 的地质灾害监测关键问题探讨 [J] . *地质科技情报*, 2019, 38(6): 141 – 149. [LIU Li, LI Chang'an, GAO Junhua, et al. Geological disaster monitoring combined with BDS and InSAR [J] . *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(6): 141 – 149. (in Chinese with English abstract)]
- [43] 韩冰, 李慧生, 秘金钟, 等. 新一代北斗/GNSS 智能终端及集成系统助力地质灾害防治 [J] . *中国减灾*, 2023(9): 26 – 29. [HAN Bing, LI Huisheng, BEI Jinzhong, et al. New generation Beidou/GNSS intelligent terminal and integrated system help to prevent geological disasters [J] . *Disaster Reduction in China*, 2023(9): 26 – 29. (in Chinese)]
- [44] GUO Wen, WANG Guoquan, BAO Yan, et al. Detection and monitoring of tunneling-induced riverbed deformation using GPS and Beidou: A case study [J] . *Applied Sciences*, 2019, 9(13): 2759.
- [45] 肖玉钢, 姜卫平, 陈华, 等. 北斗卫星导航系统的毫米级精度变形监测算法与实现 [J] . *测绘学报*, 2016, 45(1): 16 – 21. [XIAO Yugang, JIANG Weiping, CHEN Hua, et al. Research and realization of deformation monitoring algorithm with millimeter level precision based on BeiDou navigation satellite system [J] . *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(1): 16 – 21. (in Chinese with English abstract)]
- [46] HAO Ming, ZHANG Jianlong, NIU Ruiqing, et al. Application of BeiDou navigation satellite system in emergency rescue of natural hazards: A case study for field geological survey of Qinghai-Tibet plateau [J] . *Geo-spatial Information Science*, 2018, 21(4): 294 – 301.
- [47] 赵康宁. 北斗导航系统在四川抗震救灾中的应用实践与启示 [J] . *全球定位系统*, 2008, 33(4): 45 – 48. [ZHAO Kangning. Application of Beidou/COMPASS satellite navigation system in the Sichuan earthquake relief [J] . *GNSS World of China*, 2008, 33(4): 45 – 48. (in Chinese with English abstract)]
- [48] 周平根, 过静琚, 李昂, 等. 基于“北斗一号”导航卫星通讯的滑坡实时监测系统研究 [J] . *全球定位系统*, 2008, 33(5): 20 – 23+31. [ZHOU Pinggen, GUO Jingjun, LI Ang, et al. Application of No. 1 Beidou navigation satellite communication technology in the landslide real-time monitoring [J] . *GNSS World of China*, 2008, 33(5): 20 – 23+31. (in Chinese with English abstract)]
- [49] 朱永辉. 基于北斗卫星的地质灾害实时监测系统研究与应用 [D] . 北京: 清华大学, 2010. [ZHU Yonghui. The real-time monitoring system for geological disasters based on Compass Satellite System [D] . Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [50] TAO Zhigang, ZHANG Haijiang, ZHU Chun, et al. Design and operation of App-based intelligent landslide monitoring system: The case of Three Gorges Reservoir Region [J] . *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2019, 10(1): 1209 – 1226.
- [51] 方世. 卫星应急通信系统发展综述 [J] . *电子通信与计算机科学*, 2022, 4(6): 142 – 144. [FANG Shi. Overview of the development of satellite emergency communication systems [J] . *Electronic Communication and Computer Science*, 2022, 4(6): 142 – 144. (in Chinese with English abstract)]
- [52] 刘崇伟, 费立刚. 基于 TDRSS 应用的远程应急信息传输系统构想 [J] . *电讯技术*, 2017, 57(3): 270 – 275. [LIU Chongwei, FEI Ligang. A remote emergency information transmission system concept based on TDRSS [J] . *Telecommunication Engineering*, 2017, 57(3): 270 – 275. (in Chinese with English abstract)]
- [53] 刘雪梅, 刘焕军. GNSS 技术在地质灾害安全监测预警系统中的应用 [J] . *世界有色金属*, 2022(11): 10 – 12. [LIU Xuemei, LIU Huanjun. Application of GNSS technology in geological disaster safety monitoring and early warning system [J] . *World Nonferrous Metals*, 2022(11): 10 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [54] TOMÁS R, LI Zhenhong. Earth observations for geohazards: Present and future challenges [J] . *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 194.
- [55] GE Yunfeng, TANG Huiming, GONG Xulong, et al. Deformation monitoring of earth fissure hazards using terrestrial laser scanning [J] . *Sensors (Basel)*, 2019, 19(6): E1463.
- [56] 张勤, 黄观文, 杨成生. 地质灾害监测预警中的精密空间对地观测技术 [J] . *测绘学报*, 2017, 46(10): 1300 – 1307. [ZHANG Qin, HUANG Guanwen, YANG Chengsheng. Precision space observation technique for geological hazard monitoring and early warning [J] . *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1300 – 1307. (in Chinese with English abstract)]
- [57] 毕建涛, 石振, 祝彦敏. 北斗+InSAR 技术在大坝变形及周边地质灾害监测中的应用 [J] . *卫星应用*, 2021(11): 29 – 33. [BI Jiantao, SHI Zhen, ZHU Yanmin. Application of Beidou +InSAR technology in dam deformation and surrounding geological disaster monitoring [J] . *Satellite Application*, 2021(11): 29 – 33. (in Chinese with English abstract)]
- [58] 李姣, 何明. 湖南常德雷家山滑坡特征及变形监测分析 [J] . *中国资源综合利用*, 2021, 39(8): 79 – 82. [LI Jiao, HE Ming. Characteristics and deformation monitoring

- analysis of Leijiashan landslide in Changde, Hunan [J] . *China Resources Comprehensive Utilization*, 2021, 39(8): 79 – 82. (in Chinese with English abstract)]
- [59] RONG Fengjuan, CHEN Liang, GAN Yu, et al. Research on the application of geohazard monitoring and early warning based on BDS [J] . Available at SSRN, 2022, 4626472.
- [60] 陈全明, 黄炜敏, 李姣. 基于改进切线角和变形速率的滑坡预警——以湖南省石门县雷家山滑坡为例 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2024, 35(5): 133 – 140. [CHEN Quanming, HUANG Weimin, LI Jiao. Landslide early warning based on improved tangential angle and displacement rate: A case study of the Leijiashan landslide in Shimen County, Hunan Province [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(5): 133 – 140. (in Chinese with English abstract)]
- [61] 杨云建, 周学铨, 何中海, 等. 多时相数字孪生滑坡变形监测方法与应用研究——以金沙江白格滑坡为例 [J] . *水文地质工程地质*, 2024, 51(2): 132 – 143. [YANG Yunjian, ZHOU Xuecheng, HE Zhonghai, et al. Multi-temporal digital twin method and application of landslide deformation monitoring: A case study on Baige landslide in Jinsha River [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024, 51(2): 132 – 143. (in Chinese with English abstract)]
- [62] 白正伟, 张勤, 黄观文, 等. “轻终端+行业云”的实时北斗滑坡监测技术 [J] . *测绘学报*, 2019, 48(11): 1424 – 1429. [BAI Zhengwei, ZHANG Qin, HUANG Guanwen, et al. Real-time BeiDou landslide monitoring technology of “light terminal plus industry cloud” [J] . *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(11): 1424 – 1429. (in Chinese with English abstract)]
- [63] 贺添. 北斗高精度数据处理及其在川滇地壳形变研究中的应用 [D] . 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2023. [HE Tian. High-precision data processing of Beidou navigation satellite system and its application to the study on crustal deformation of Sichuan-Yunnan [D] . Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration 2023. (in Chinese with English abstract)]
- [64] 王阅兵. 北斗卫星导航系统应用于高精度形变监测的关键技术研究 [D] . 北京: 中国地震局地质研究所, 2022. [WANG Yuebing. Study on key technologies of Beidou navigation satellite system in high-precision deformation monitoring [D] . Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [65] 高鹏程, 张煦, 王婧. 地质灾害监测预警技术创新及应用研究 [J] . *环境与发展*, 2023, 5(11): 37 – 39. [GAO Pengcheng, ZHANG Xu, WANG Jing. Research on innovation and application of geological disaster monitoring and early warning technology [J] . *Environment and Development*, 2023, 5(11): 37 – 39. (in Chinese with English abstract)]