

• 自然灾害防治体系 •

DOI: 10.3724/BNSFC-2025-0030

自然灾害监测技术体系*

许强^{1†**} 朱鸿鹄^{2†} 朱星^{1**} 刘晓磊³
余琛⁴ 许冲⁵ 谭道远² 李涛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, 成都 610059
2. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023
3. 中国海洋大学 山东省海洋工程地质与环境重点实验室, 青岛 266100
4. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054
5. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085

[摘要] 在全球气候变化加剧自然灾害复合链式风险的背景下,我国亟需构建精准高效的现代化监测技术体系。本文提出“理论突破—技术攻关—国家统筹”三位一体的自然灾害监测技术体系。通过构建多灾种组合联动指标体系与多源异构数据融合智能分析理论,突破灾害链演化机理表征和感知分析理论瓶颈;研发“天—空—地—内(海)”多维协同监测技术、“云—边—端”互联互通架构及极端环境适应性监测装备,破解极端环境多灾种精准感知与动态监测难题;在国家层面实施“全国形变一张图”InSAR卫星计划、“全域激光雷达”三维建模及多主体数据共享机制,建立统一数据标准规范,实现全国范围全域覆盖、动态更新与共享共用。该体系可为解决监测信息孤岛、空间覆盖不足等五大共性问题提供系统性解决方案,为筑牢国家安全防线提供坚实的科技支撑。

[关键词] 自然灾害;融合感知理论;协同监测技术;数据标准规范;共享共用机制

我国地处全球自然灾害最活跃地带,灾种多样、分布广泛、损失巨大,逾70%的城市与50%的人口暴露于高风险区。在全球气候变化加剧、极端天气灾害频发的背景下,洪涝、地震、地质灾害及其链生灾害(如地震—滑坡、台风—暴雨—洪涝)的发生频次显著增加,造成损失急剧扩大,对国家公共安全与可持续发展构成严峻挑战。因此,构建精准高效的现代化灾害监测技术体系,已成为践行总体国家安全观、保障人民生命财产安全和社会长治久安的迫切战略需求。党和国家高度重视自然灾害防治能力建设。党的十八大以来,《关于推进防灾减灾救灾体制机制改革的意见》等一系列政策奠定了“统一领导、分工负责”的跨部门协同监测制度基石。党的十九大更将“提升防灾减灾救灾能力”纳入国家治

理现代化核心战略。《“十四五”国家综合防灾减灾规划》明确提出建设“天—空—地一体化监测预警网络”,并设立预警时效、风险数据库覆盖率等约束性指标,这标志着我国监测体系从基础设施规模化建设迈向数据驱动型智能化决策的新阶段。

近年来,自然灾害呈现多灾种耦合、跨介质传导的复合演化特征,传统单维度、分散化的监测模式因时空覆盖盲区与数据融合壁垒,难以支撑复合灾害链的精准风险研判,亟需构建“天—空—地—内(海)”多维立体协同监测体系(图1),重塑自然灾害监测范式。天基平台中,风云气象卫星全域追踪大气环流、台风路径等气象要素演变规律^[1],高分三号雷达卫星以微波穿透性解析云雾区地表形变过程^[2],海洋一号光学卫星精准识别海

收稿日期:2025-07-31; 修回日期:2025-09-29

† 共同第一作者。

* 本文根据国家自然科学基金委员会第410期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email:xq@cdut.edu.cn;zhuxing15@cdut.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(42225702,42572371)的资助。

引用格式: 许强,朱鸿鹄,朱星,等. 自然灾害监测技术体系. 中国科学基金,2025,39(6):893–904.

Xu Q, Zhu HH, Zhu X, et al. The monitoring technology system of natural disaster. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(6):893–904. (in Chinese)



图1 自然灾害“天—空—地—内(海)”多维立体协同监测示意图

Fig.1 Schematic Diagram of Multi-dimensional Collaborative Monitoring of Natural Disasters Involving “Sky-Air-Ground-Inland (Sea)”

岸侵蚀、海表温度异常等海洋灾变信号^[3]。空基无人机、浮空器构建快速响应单元,搭载多光谱相机、激光雷达,快速完成局地灾情的三维测绘,弥补卫星重访时间间隙^[4,5]。地基系统采用全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)接收机、雨量计、裂缝计等终端,实时采集地表三维位移^[6]、降雨强度^[7]与裂缝扩展数据^[8],探地雷达穿透浅层介质,探测地下空洞、隐伏裂缝以及软弱结构面的空间分布^[9]。海基波浪滑行器、水下滑翔机、海底地震仪与潜标协同组网,监测波浪动力、海底滑坡与海洋水文变化,填补海洋灾害监测盲区^[10,11];地下光纤综合测孔、测斜仪等深度融合,精准捕捉断层活动、地下水位变化与地层形变规律,破解地下灾害的不可见性难题^[12,13]。构建多元协同监测体系的同时,通过多源异构数据融合打破灾害监测的介质壁垒^[14],实现灾害链的动态推演,为自然灾害防治从“被动应对”转向“主动预防”提供核心技术支持,助力提升国家灾害风险治理的系统性与科学性,具有非常重要的研究价值和实践意义。

1 自然灾害监测技术发展现状与挑战

我国幅员辽阔,地理环境复杂,是全球自然灾害最严重的国家之一。主要灾害类型包括气象灾害(如台风、暴雨)、地质灾害(如滑坡、泥石流、崩塌)、地震灾害、海洋灾害(如风暴潮、巨浪、赤潮)以及森林火灾。这些灾害具有突发性强、破坏力大、影响面广等特点,严重威胁人民生命财产安全和经济社会高质量发展。建立一个全域覆盖、多维感知的自然灾害监测技术体系,是实

现灾害精准预警、高效防控和科学减灾的关键基础。本节将重点围绕上述五类典型自然灾害,系统梳理其监测技术体系的现状和挑战。

1.1 气象灾害监测现状与挑战

在气象灾害监测方面,我国已形成以气象卫星多源遥感数据主导宏观预报、地面(或者海面)监测站和雷达网络支撑精细化数据获取的立体化体系,初步构建了全球规模最大的“天—空—地—海”一体化综合观测系统。根据中国气象局2025年统计,我国气象观测系统包括8颗在轨风云气象卫星、546部天气雷达及9万余个地面观测站,气象灾害监测覆盖率达80%,强对流预警提前量达43分钟,暴雨预警准确率创历史新高。风云卫星服务覆盖133个国家和地区,北斗探空系统将台风路径预报误差缩小至38千米,交通气象监测等部分领域达到国际领先水平。

然而,由于复杂地形区域监测密度不足,难以捕捉微尺度气象现象^[15],城市“热岛—雨岛”效应(如华南大湾区极端降水受热岛与地形协同影响)的精细化监测能力十分有限,现有预报技术水平难以满足精准防灾需求。在局地强天气探测和实时数据采集方面,我国通过智能网格预报(分辨率达1千米)、AI大模型(如“风雷”“风清”)和递进式预警机制,显著提升了短临预报能力。但是,突发性暴雨等极端天气的预测仍存在不确定性,毫米波雷达、激光雷达等高端装备的国产化率也有待提升。此外,尽管已建成覆盖乡镇的自动监测站网,山区、海洋等偏远地区的监测盲区仍制约数据完整性和空间覆盖度。相比国际先进水平,我国在数值预报模式

分辨率与多灾种早期预警系统集成等方面仍有显著差距,亟需持续研究突破^[16]。

1.2 地质灾害监测现状与挑战

为了破解地质灾害防治工作中“何时发生”的核心问题,我国已初步建成了地质灾害“天—空—地”协同监测体系,利用卫星光学遥感与SAR卫星实现广域地质灾害隐患的普查和变形过程追踪监测,利用无人机摄影测量和LiDAR实现区域地质灾害隐患的精细核查和变形迹象动态监测,利用灾害隐患点的地基传感设备实现地质灾害实时自动化监测,结合预警模型和实时监测预警系统平台实现灾害早期预警和主动防范^[17,18]。近年来,在中央和自然资源部的指导部署下,中国地质环境监测院联合各高校、企事业单位开展协同攻关,自主研发了一系列普适型地质灾害监测仪器,如雨量计、北斗GNSS、裂缝计、泥位计等,并在全中国范围内推广应用,初步形成了地灾监测技术支持保障体系,挽救了数万人的生命安全和财产损失^[19]。

然而,现有的地质灾害监测技术体系仍存在三大短板:(1)监测覆盖不足,偏远山区和隐蔽隐患点难以做到全面覆盖,监测盲区问题依然突出^[20,21];(2)数据准确性有限,传感器受环境干扰、误差累计影响,难以捕捉细微的灾害孕育过程与机制^[22-24];(3)设备可靠性有待提升,野外高湿、高温差环境下监测仪器寿命短,维护成本高,难以保障长时间正常运行^[25-27]。为应对上述挑战,亟需统筹推进“卫星普查—无人机详查—物联网补盲”多层组网,在偏远山区与隐蔽隐患点布设低成本、低功耗微型传感节点,实现盲区清零;深度融合InSAR(合成孔径雷达)卫星遥感与地面、地下传感器的多源感知数据,大幅提升变形监测精度;同步研制耐候型、自供能的野外监测装备,配套“云—边—端”协同运维平台,实现故障自诊断、远程升级和无人值守,确保监测系统长期连续运行。

1.3 地震灾害监测现状与挑战

地震灾害具有突发性强、波及面广、次生灾害多等显著特点,是我国自然灾害防御体系长期面临的严峻挑战之一。近年来,随着数字地球、空间信息和智能感知等技术的快速发展,我国地震监测能力显著增强。目前,由国家地震烈度速报与预警工程支持,我国已建成全球最大的融合式实时地震观测站网,全国共计接入18 000余个站点。该系统部署“云—边—端”协同一体的数据实时处理技术系统,形成了秒级预警、分钟级烈度速报能力。在华北、南北地震带、东南沿海等重点预警区,震后首报用时平均约7 s(M 4.0稳定处理),乡镇级烈度速报空间分辨率约7千米,数量、性能和功能迈入国际领先行列。在地壳

运动观测方面,以GNSS连续观测网、InSAR干涉雷达遥感、重力观测和地应力监测为代表的技术体系,已广泛应用于活动构造区的形变监测与震前异常识别。“十五”期间建成的中国大陆构造环境监测网络(简称“陆态网络”),使得我国连续GNSS观测站达到260个,流动观测站达到2 000个,基准站水平分量测定精度优于2 mm/a^[28]。中国大陆已拥有全球领先的GNSS地壳运动观测网络,覆盖广、密度高,重点构造区布设精细。当前的关键在于如何高效利用这些先进设备及其海量观测数据,产出具有国际影响力的科研成果,服务国家需求,贡献全球地球科学研究。中国测震台网是国家防震减灾体系的核心支撑,为地震监测与地球科学研究提供了关键基础数据。截至2024年底,全国实时汇集交换的测震台站有1 178个,其中国家台站166个,区域台站1 012个^[29]。除青藏高原西缘、新疆南部及内蒙古北缘边界区域以外,中国测震台网的实际监测能力可实现 M_L 3.0以上地震监测^[30]。当前,地震灾害监测体系面临的主要挑战有:(1)短临预报仍是世界难题,氦气、电磁异常等前兆信噪比低且物理机制不明;(2)台站疏密不均,内部多场观测和重点区域观测覆盖不足;(3)SAR观测卫星资源不足,持续观测时段较短,空间覆盖不够。面向未来,亟需构建“深地—深海—深空”多场智能感知体系,打造物理—数据双驱动的AI预测模型,实现强震前兆的多维高精度捕捉,推动人工智能、量子传感等技术与地震灾害监测的深度融合。

1.4 海洋灾害监测现状与挑战

随着国家海洋资源勘探和相关工程建设的深入,海洋灾害防治研究正从“经验驱动”迈向“数据驱动”。在这一进程中,监测技术与装备的持续进步是提升海洋灾害防灾减灾水平的关键。目前,海洋灾害监测技术呈现出多元化、立体化、实时化特征,以卫星遥感、近岸基站、海洋浮(潜)标、海底坐底式平台为核心,科考船、潜水器、断面调查、地球物理探测等手段为辅的监测体系已初步成型(图2)。在技术层面,高精度、宽量程的传感技术已取得显著进展:针对深海压力下的沉积物强度量测难题,研发出了精度达0.1 kPa的光纤布拉格光栅压力传感器^[31];“定点式温盐深测量系统”创下国产温盐深测量仪5 915米最大试验水深的记录^[32]。在装备层面,浮(潜)标、坐底式平台、潜水器等设备不断迭代优化:SEEGeo坐底式平台结合实时通讯浮标,实现了连续12个月的海底原位长期监测^[33];从“蛟龙号”到“奋斗者号”,国产潜水器相继刷新下潜深度^[34]。除此之外,东海、南海观测网络陆续建成并获取了海量数据^[35],推动了海洋科学研究快速发展。

“十二五”以来,在国家科技驱动下,我国近海常规

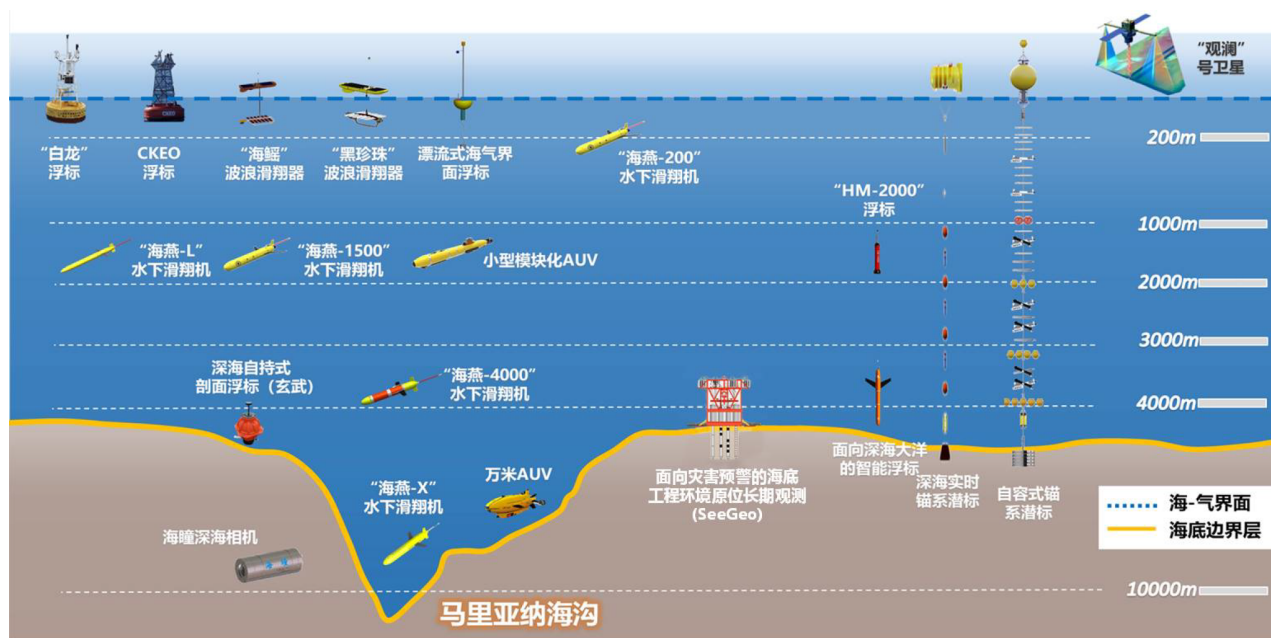


图2 海洋灾害“天—空—地—海”多维协同监测示意图

Fig.2 Schematic Diagram of Multi-dimensional Collaborative Monitoring of Marine Disasters Involving "Sky-Air-Ground-Sea"

监测传感器研发取得显著进步,国产化率已逾70%^[36],海洋水动力灾害监测技术逐步成熟。然而,海底灾害的监测技术仍存在明显短板,亟待突破。海洋地质灾害的演化具有链式结构的放大效应^[37,38],如滑坡体的相态转化与沿程侵蚀级联效应,现有装备技术难以满足灾害全过程、跨介质、多灾种的协同监测需求。如何构建并部署全天候、高可靠的原位监测装备系统,已成为海洋灾害监测技术亟需攻克的核心挑战之一。

1.5 森林火灾监测现状与挑战

在全球气候异常、极端天气事件频发的背景下,森林火灾对我国生态环境安全与社会可持续发展构成巨大威胁^[39]。近年来,遥感技术、无人机系统、物联网感知网络以及人工智能技术快速发展^[40-42],推动我国初步构建了“天—空—地—人”森林火灾监测体系。卫星遥感(“高分”系列卫星、MODIS/VIIRS)作为大尺度监测手段^[43,44],覆盖范围广、周期性强,能实现大范围林区的快速扫描和热异常识别;无人机平台搭载高分辨率可见光、红外热成像与激光雷达,实现近距离火情探测与局地火势蔓延评估^[40,45];物联网(Internet of Things, IoT)感知网络则通过在林区部署温湿度、烟雾、CO₂浓度等传感器节点,精准感知火情发生早期的热异常或烟雾浓度突变^[46],通过低功耗LPWAN通信将数据实时回传;视频监控与人工智能算法(如YOLOv5、U-Net、LSTM)结合,可精准实现火点智能检测、火区分割和燃烧趋势预测^[47,48]。

由于森林火灾的突发性、隐蔽性,现有监测技术体

系仍然面临如下挑战:(1)监测覆盖不足。卫星和无人机遥感时空覆盖不全,传感器网络节点安装有限,难以实现实时火灾隐患识别^[49-51]。(2)监测精度不高。多数卫星遥感非专为火灾监测设计,地表反射阳光易导致火灾活动检测误报和燃烧面积监测精度较低,且难以捕捉小型、林下或地表火灾^[52]。(3)算法适应性不强。植被类型、火灾行为和气候的区域差异,导致开发普适性全球算法难度大,而针对特定区域定制的算法难以推广至其他地区,导致监测标准不统一。同时,目前图像识别算法仍依赖大量标注样本,泛化能力和解释性尚需加强^[53]。

2 自然灾害监测技术仍存在的共性问题

2.1 面向数据共享共用,监测信息孤岛鸿沟亟待跨越

其核心问题在于体制壁垒与标准碎片化。当前气象、地质、地震、森林、海洋等灾害监测数据分散于不同部门、机构和层级,缺乏国家层面统一的数据共享管理平台与强制性的共享机制。数据格式、协议、存储方式差异显著,跨领域、跨区域的数据互联互通性极差。这种数据割裂状态不仅造成信息重复采集与资源浪费,更严重阻碍了多灾种耦合分析、灾害链综合研判以及跨部门协同应急响应的效率,无法形成灾害综合风险全景图,制约了监测数据的最大效能释放,是体系化建设面临的首要瓶颈。

2.2 面向全域监测难题,监测空间覆盖广度亟待提升

其核心问题是现有监测网络覆盖不平衡,存在大量

“空白区”。空间覆盖上,高山、峡谷、远海、深地、偏远林区等人迹罕至或环境恶劣区域的监测站点稀疏甚至完全缺失;要素覆盖上,针对次生灾害、垂直剖面结构(如地下及大气垂直层)及关键致灾过程(如土壤侵蚀、断层微蠕动、洋流异动)等的感知能力普遍薄弱。这导致对灾害孕育环境与发展动态的掌握不够全面,难以准确捕捉灾害全链条、全要素信息,特别是对大面积、隐蔽性强的灾害的早期识别和精准定位能力严重不足,无法实现真正的“全域立体感知”。

2.3 面向应急能力提升,监测时间分辨率亟待智能优化

其核心问题在于缺乏从缓变到突变的精细化、全时段监测能力。当前监测数据的时间分辨率在灾害发展的不同阶段(孕育、潜伏、临发、爆发、持续、消退)普遍不足;对缓变过程的长期连续高精度监测易被忽视,对临灾突发信号的捕捉常因采样频率不足而产生迟滞;实时信息处理与智能预警模型的融合不够紧密,导致灾害响应“窗口期”缩短。迫切需要建立自适应、按需调控的智能监测模式,强化全过程(特别是临界转变期)的连续追踪与快速响应能力,以精确支撑灾害短临预警和应急决策。

2.4 面向多源融合监测,监测标准机制亟待统一规范

其核心问题是多源异构数据有效融合监测的标准缺失。各类传感器(空基、地基、海基)、不同观测手段(卫星遥感、地面站网、雷达、无人机等)的技术标准、观测规范、数据质量评估体系以及处理流程彼此独立,缺乏统一、明确的国家级基准规范进行约束和对标。这使得跨平台、跨类型数据的集成、同化、可靠性验证与互补性应用变得复杂困难,导致信息冗余、质量参差甚至相互矛盾。亟需建立覆盖“采集—传输—处理—应用”全

链条的强制性国家技术标准与数据质量管控体系,消除融合壁垒,确保信息集成的一致性与可靠性。

2.5 面向极端环境监测,新型传感装备亟需创新研发

其核心问题是现有监测设备难以适应深海、高海拔等复杂恶劣的极端环境挑战。在高寒、高温、深海、高压、强腐蚀、强电磁干扰、剧烈冲击震动等极端物理化学环境以及灾害发生时的恶劣工况下,传统传感器普遍存在可靠性低、寿命短、精度下降乃至失效的问题。具备在极端条件下持续稳定工作,保持高精度、低功耗、自组网能力的智能传感装备严重匮乏。这直接限制了地质灾害深部探测、海洋灾害深远海监测、森林火灾核心区感知等关键场景的覆盖深度与精度。加速研制高鲁棒性、自适应性、微型化、智能化的新一代极端环境传感器及组网系统,是突破极端环境下监测能力天花板的核心技术需求。

3 自然灾害综合监测体系构建

3.1 理论体系构建

为适应复杂灾害链防控需求,需要在理论层面构建新的监测指标和数据分析体系。本文提出两个互补的核心理论体系(图3):其一是多灾种组合联动与协同感知的监测指标体系,其二是多源(多模态)异构数据融合与智能分析理论。监测指标体系解决“测什么”的问题,数据融合与智能分析理论解决“怎么用”的问题。两大理论体系相辅相成,构成了新一代自然灾害监测技术体系的理论支柱,旨在提升对灾害孕育与演化过程的全面感知和智能研判能力,为构建多灾种立体协同监测网络和智能化灾害预警决策提供了坚实的科学基础和技术路径。

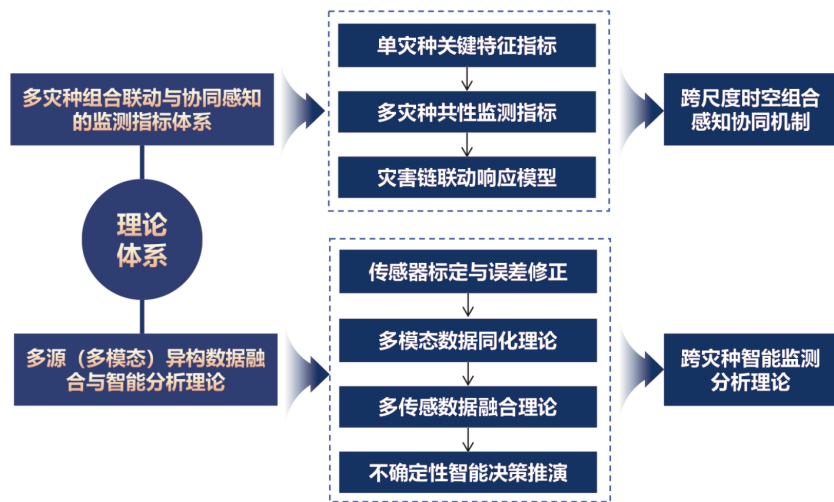


图3 自然灾害监测技术之理论体系

Fig.3 Theoretical System of Natural Disaster Monitoring Technology

3.1.1 多灾种组合联动与协同感知监测指标体系

不同自然灾害类型往往具有耦合关联和链式触发效应^[54,55],强降雨可能引发山洪和滑坡,地震可能诱发山体崩塌甚至次生地质灾害,亟需将监测从单一灾种视角拓展到多灾种协同,建立能够反映灾害组合联动特征的指标体系。传统管理模式,各灾种由不同部门管理,监测指标缺乏统一标准。为打破“信息孤岛”,理论上需要梳理各主要灾种的致灾机理、影响因素及关键监测指标,提炼共性特征指标,进而构建跨灾种的关联指标体系。

首先,解构单灾种核心指标,基于气象、地质、地震等典型灾种的本征致灾机制,构建可量化、可追踪的物理特征参量,破除传统经验型指标的模糊性。其次,凝练跨灾种共性指标,通过识别多灾种共同依赖的驱动因子(温度、降水、水位、动力荷载等),建立统一量纲的普适性监测基准,解决指标定义碎片化问题。再次,建立灾害链联动响应模型,基于物理过程与数据驱动融合的混合范式,解析灾种间触发、放大与级联机制(如冰岩崩—冰湖溃决—山洪泥石流灾害链的物质运移、相态转变和能量传递),形成“关键环节触发—临界状态跃迁—级联路径推演”的动态量化模型。最终,构建跨尺度时空组合感知协同机制。空间上,通过“天—空—地—内(海)”多维立体智能组网,按灾害链空间扩展规律动态分配感知密度;时间上,依据灾变阶段自适应调整观测频率^[56,57],建立卫星遥感动态跟踪监测与地面(下)专业实时监测的组合协同和动态校验机制,最终形成对灾害系统演化行为的智能感知与主动式风险防范能力。

3.1.2 多源异构数据融合与智能分析理论

随着监测手段的多元化,灾害监测领域已进入大数据时代:卫星遥感影像、气象雷达、地震台网、GNSS形变监测、无人机航测以及地面传感器等不断产出海量异构数据^[58-60]。如何将这些时空分辨率各异、格式多样的数据进行有效融合,并从中智能提取灾害关键信息,是重大理论挑战。为此,需要建立多源数据融合与智能分析理论体系,解决“数据怎么用”的问题。

对于理论体系,建议从以下几个方面开展研究:(1)强化传感器标定与误差修正方法。针对天—空—地—海立体观测网络中传感器电磁、温漂、大气等复杂干扰因素,建立基于传递标准溯源与自适应环境补偿的动态标定模型,保障极端环境下原始数据的物理一致性与时空基准统一。(2)发展多模态数据同化理论。突破遥感影像、无人机测量、地基传感、群测感知等异构数据在时空尺度、维度、分辨率上的不匹配性,通过物理场约束的变分同化与深度生成融合技术,将多源信息嵌入统一

数值框架,形成“数据—模型”双向驱动的协同反演能力。(3)构建多传感器数据融合理论。基于博弈论与证据推理的混合框架,设计基于人工智能的轻量化特征级融合架构,解决跨平台信息冗余冲突、跨灾种特征解耦等关键问题。(4)开发不确定性智能决策推演方法。可考虑结合贝叶斯分层建模与深度强化学习,建立多源监测数据的可信度评估体系和质量控制理论,量化传导链路风险概率。(5)凝练为跨灾种智能监测分析理论。建立跨灾种智能监测知识图谱,突破灾种数据孤岛限制,在统一架构下支撑自然灾害异质场景的协同认知,形成具有抗干扰、可解释、强泛化能力的灾害智能中枢。多源异构数据融合与智能分析理论的建立,将全面提升自然灾害监测的智能化水平,实现从被动监测向主动感知、从经验判断向智能决策的跃升。

3.2 技术体系构建

3.2.1 “天—空—地—内(海)”协同监测技术体系

构建以卫星遥感(天)、航空与无人机平台(空)、地面监测台站(地)、地下与海洋探测系统(内/海)为一体的“天—空—地—内(海)”多维协同自然灾害监测技术体系,是提升我国自然灾害综合感知能力的重要方向之一。天基平台由地球同步轨道卫星、中轨卫星、低轨卫星以及地面通信站组成,卫星通过搭载光学和SAR传感器实现对广域自然灾害的隐患识别和追踪监测;空基平台主要由节点无人机、无人机集群以及无人机机巢组成,通过搭载光学、LiDAR等传感器实现对自然灾害的精细调查和动态监测;地基平台是由地面移动感知装备(如车载巡检系统)、固定监测站、地下(海洋)监测装备构成实时感知终端,通过LoRa/4G/5G/卫星等多模态组网技术建立分布式监测感知网络,实现重点区域全天候实时监测。该体系通过多源感知实现时空互补、精度耦合与信息融合,在提出多灾种共性监测指标与灾害链组合联动响应模型的基础上,建成适用于多灾种的共性多维立体协同监测技术体系。

近年来,我国已在多个灾害领域初步建立了“天—空—地—内(海)”协同监测技术体系,但尚未建立自然灾害统一规范的监测技术体系,有必要进行整体层面、系统性建设。首先,如何协同观测和优化资源配置,建立多灾种跨平台数据接入标准、多源异构数据时空基准统一规范以及多源数据质量动态评估与优选策略,是实现多灾种时空感知数据全覆盖迫切需要解决的问题。其次,开展多灾种数据同化融合模型、智能动态组网与资源调度、全息感知建模与场景推演等核心技术研究,实现跨灾种数据融合同化和灾害动态演化场景推演,解决灾害风险动态感知与超前研判难题。最后,极端复杂

环境下的灾害动态感知精准度有限,亟需在星链(座)与无人机机库等遥感观测升级、量子新型传感器和灾害链数字孪生场景推演等方向开展系统研究和创新突破,形成覆盖跨圈层、多灾种、多场景、多尺度的立体感知技术体系。

3.2.2 “云—边—端”智能监测技术架构

自然灾害监测数据在突发场景下呈现出高频率、高冗余、高复杂度的典型特征,对数据处理能力、时效性和稳定性提出了更高要求。传统“中心化”监测体系已难以支撑灾害应急的快速响应和弹性扩展需求,因此,亟需建立以“云—边—端”协同为核心的新型信息化技术架构,推动监测数据在采集、传输、处理、应用各环节的智能化升级。“端”包括各类传感器节点、无人装备、台站设备等现场前端感知装置,负责完成原始数据的采集和初步过滤;“边”指部署在本地或近场的数据处理单元,如边缘计算终端、现场数据中心等,承担初步分析、事件识别、模型调用等功能,提升响应时效和数据安全性;“云”则承担大范围的数据融合、建模预测、综合分析与服务发布职能,为全局指挥与战略决策提供支撑。通过“云—边—端”互联互通,能够实现监测资源的动态调度与组合式配置,推动形成“广覆盖、强现场、快响应”的监测模式。

建立“云—边—端”互联互通监测技术体系的关键是构建“云中心全局决策—边缘节点实时研判—终端设备敏捷响应”的闭环架构。因此,亟需开展智能协同计算(数据—模型—算力的动态优化匹配,如灾害预警模型按需下沉至边缘节点)、可信安全互联(区块链存证+跨机构隐私计算)、自主进化引擎(在线学习驱动的算法自适应迭代)等核心技术的研究攻关,并在边缘侧低时延自主研判(本地化决策/任务分配)、量子安全通信及绿色智能算力范式方面取得新的突破,助力国家“东数西算”能力建设,打造自然灾害动态优化的智能决策大脑。

3.2.3 极端复杂环境下自然灾害监测关键技术与智能装备

随着全球气候变化和人类活动影响的加剧,自然灾害呈现出突发性、复合性、链生性增强的新特点,尤其在高山峡谷、地震活跃带、深海、深地等通信条件差、环境恶劣的极端区域,传统的监测手段往往难以稳定、可靠地运行。这些地区不仅地形复杂、交通不便,还常伴随强风、极端温差、冰雪覆盖或信号中断等严峻条件,对监测技术的环境适应性、设备耐久性与数据传输可靠性提出了极高要求。因此,有必要发展面向极端复杂环境的灾害监测关键技术与智能化装备,实现广域覆盖与精准

感知。针对现有设备在极端环境(高寒/高温/深海/强干扰)下可靠性骤降、精度失准等瓶颈,亟需突破三大核心技术:(1)耐候型传感器技术。研发适用于深海、深地抗高温、高压的微型传感器(如量子传感、仿生传感、光纤传感等),通过微纳工艺集成多参量感知模块,实现振动/形变/温压/化学等多维信息高鲁棒性采集。(2)极端环境数据组网传输技术。构建无人机集群、星机互联、星地互联以及水下声呐通信的智能组网架构,支持无中心自组网通信与抗毁拓扑重构(如森林火场高温环境下的集群航迹协同);开发声—光—电多模异构通信中继,贯通深海至太空的数据链(如水下蓝绿激光与低轨卫星直连)。(3)极端环境设备安装与运维技术。革新自供能技术(如压电—热电—电磁复合微弱能量转化和取能装置)、无人机抛投部署工艺,并嵌入边缘智能环境感知诊断模块,实现对环境感知的自适应保护和故障修复功能。加速研制高鲁棒性、自适应性、微型化、智能化的新一代极端环境下的监测感知、组网通讯和安装运维关键技术和设备,是突破极端环境下监测能力极限的有效路径,最终形成极端环境智能装备体系,支撑全域灾害监测能力跃升。

3.3 国家体系构建

3.3.1 建议构建和强化“天—空—地—海(内)”多灾种协同监测网络国家布局

(1)构建多灾种、全要素、全过程的卫星立体观测体系,实施“全国形变一张图”和“光谱中国”计划。天基层面,面对当前我国卫星资源紧缺(仅占全球6%),时空覆盖率和分辨率尚不能满足我国自然灾害监测需求的现状,亟需建设基于光学、SAR和光谱卫星的区域凝视、连续监测、动态普查的卫星星座和观测体系,构建小型化、低成本、智能化的卫星立体观测体系(图4):(1)在星座架构上,需要加速部署轻量化、小型化、低成本、智能化的高分辨率遥感卫星群,形成低轨高分辨星座,实现重点灾害区10分钟级重访;同步发展低倾角、高重访、全极化、高分宽幅以及星载处理分析的高精度InSAR卫星链,破解复杂山区环境成像几何畸变和叠掩的固有缺陷,将重访周期从12天缩短到3天以内,突破毫米级地表位移监测瓶颈,实施“全国形变一张图”计划,定期动态更新和数据共享,为地震、滑坡、火山、沉降等灾害隐患识别与预警提供支撑;实施“光谱中国”计划,发展和建设高分辨率、高频重访的超光谱技术和光谱遥感卫星,研究宽谱段覆盖和多谱段融合的标准化、智能化光谱实时动态处理核心技术,建立全球自然灾害、生态环境光谱数据库,提升地质勘探、冰雪灾害、火山、林火、水汽等多场景业务化监测能力。(2)在技术赋能层面,研发星上AI



图4 遥感卫星星座、无人机及地面物联感知的多维监测网络布局

Fig.4 Multi-dimensional Monitoring Network Configuration Integrating Remote Sensing Satellite Constellations, Unmanned Aerial Vehicles, and Ground-based IoT Sensing

边缘计算模块,构建“灾害链数字孪生—卫星智能响应”闭环,实现灾情自主研判与观测模式动态优化(如震后自动加密余震区扫描)。(3)在机制创新领域,建立国家级卫星减灾联动平台,统筹军民商资源,实施“按需敏捷调度”;建设多灾种卫星数据中心,推动SAR—光学—高光谱数据深度融合。通过建成全球首个“地质—气象—生态”耦合观测星座,实现多灾种天基监测覆盖率 $\geq 90\%$,彻底扭转核心数据受制于人的被动局面,筑牢大国自然灾害防控天基防线。

(2)实施“全域激光雷达计划”,构建高精度实景三维数字底座,助力“数字中国”建设。光学/InSAR卫星遥感虽能直观观察到大面积的地质形变,但对于处在高山密林中的小型滑坡体、地质损伤(如裂缝、下错台坎等)等高隐蔽性地质灾害隐患就无能为力,而激光雷达遥感技术可以获取到厘米级的点云数据,且能过滤植被,建立高精度的地表三维模型,解决高山密林郁闭度和隐蔽性的难题。为实现广域激光雷达数据采集与实景三维建设,需统筹天基、空基与地基多源数据采集,优先对地质灾害高风险区(如西南山区)和经济发达城市群开展厘米级激光扫描,结合倾斜摄影生成三维模型,同步构建分布式云计算平台,整合多行业数据,形成时空统一的数字孪生底座,支撑自然灾害预警预测,最终实现全国范围“分钟级”动态更新与多部门协同治理。同时,通过激光雷达遥感技术获取尽可能丰富的多领域空间数

据,建立共享机制,为自然灾害防治、山水林田湖草沙调查评估以及电力、交通、水利、市政建设等多行业多领域的科学研究、政府决策、产业发展提供精准三维数据支持。

(3)构建无人值守机库,实施“航拍影像全覆盖”计划,提升自然灾害应急监测能力。为加强自动巡检与应急,应统筹规划高自然灾害风险区无人机机库网络建设,采用“固定机库+移动基站”的混合部署模式,重点在西南山区、东南沿海等灾害频发区域布设智能机库,集成5G远程控制、AI航线规划及多光谱传感技术,构建“卫星遥感预警—无人机快速核查—地面传感器验证”的三级响应体系,实现灾前定期巡检、灾时自动组网侦察与灾后评估的全流程智能化作业;组建航空遥感联盟,跨单位、跨部门整合优化资源配置,汇聚数据成果,避免重复建设和资源浪费;构建航空遥感数据共享平台,通过国家级灾害管理平台实现数据实时共享与跨区域协同调度,实现全国范围全域覆盖、实时动态更新和共享共用。

(4)增补气象雷达和地面观测站,实现气象雷达全覆盖,提升山区的局地气候监测能力。需增补多尺度、立体化气象雷达设施,在关键区域(如滑坡易发区、山洪沟谷)加密部署微型气象站,结合地基微波辐射计和激光测风雷达捕捉山谷风等微气象过程。同步建设无人机移动观测集群,通过物联网技术整合现有站点数据,

构建基于AI的山区三维风场和降水精细化分析模型,并接入智能网格预报系统,显著提升局地强对流和突发性暴雨的预警能力。

3.3.2 建议建立多主体协同联动监测与多源数据融合共享共用机制

在国家层面上,应建立“政府主导、部门协同、社会参与”的联动机制,通过立法明确各方职责并制定统一数据标准,搭建国家级自然灾害监测大数据平台(如整合气象、水利、自然资源等12个部门数据),采用区块链技术确保数据安全共享,建立“监测—预警—处置”全链条协同流程,引入企业、高校、科研机构等社会力量参与,运用云计算和AI技术实现多源异构数据的实时融合与智能分析,最终形成跨部门、跨区域、跨层级的灾害监测“一张网”和应急响应“一盘棋”。

3.3.3 建议建立数据采集、传输、存储与共享统一标准规范

为实现数据采集、传输、存储与共享,应规划制定自然灾害监测数据全流程管理规范,建立涵盖数据采集、传输、存储与共享的全流程标准化体系,依托国家级灾害大数据中心实现多源异构数据的统一编码和质量控制,同步开发标准化数据清洗工具和元数据模板,要求各级监测机构强制执行数据分级分类标准,并建立动态更新机制确保标准与技术进步同步迭代,最终实现跨部门、跨层级数据的无缝对接与融合应用。

4 结语

近年来,我国自然灾害监测技术体系已从单灾种分散监测迈向多灾种协同智能感知的新阶段。面向我国自然灾害治理体系建设的迫切需求,未来自然灾害监测技术体系亟需构建“理论创新引领—技术融合驱动—国家体系保障”的闭环路径,筑牢“多灾种—全要素—全过程”的灾害防控科技防线,支撑国家安全战略从被动应对转向主动防御。在理论层面上,灾害链联动模型与智能融合分析理论奠定风险全景认知基石;在技术层面上,建设自主可控的卫星体系,通过“天—空—地—内(海)”立体组网实现高时空分辨率的自然灾害动态监测,组合协同感知与边缘智能计算,实现分钟级响应,研发新型传感技术与装备,攻克极端环境监测难题;在国家层面上,构建多灾种、全要素、全过程的卫星立体观测体系,实施“全国形变一张图”和“光谱中国”计划,建立无人值守机巢,实施“全域激光雷达”和“航拍影像全覆盖”计划,搭建资源共享平台,建立数据共享机制,破除“信息孤岛”,助力“数字中国”和“平安中国”建设。

致谢 感谢参加“双清论坛”的全体专家及地球科学部相关领域的科学家。

参考文献

- [1] 何杰颖,张升伟,王振占,等. 风云气象卫星微波大气探测回顾与展望. 空间科学学报,2023,43(6):1025—1035.
He JY,Zhang SW,Wang ZZ,et al. Prospects for microwave atmospheric sounding of the new generation of Fengyun Meteorological Satellites. Chinese Journal of Space Science,2023,43(6):1025—1035. (in Chinese)
- [2] 肖儒雅,王迅,孙静怡,等. 国产SAR卫星差分干涉测量地表形变监测比较. 武汉大学学报(信息科学版),2025,50(8):1517—1526.
Xiao RY,Wang X,Sun JY,et al. Comparisons of differential interferometry of Chinese SAR satellites in ground deformation monitoring. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(8):1517—1526. (in Chinese)
- [3] 范文龙,黄小仙,傅雨田. 海洋一号卫星水色水温扫描仪红外信息获取. 遥感学报,2022,26(8):1589—1601.
Fan WL,Huang XX,Fu YT. Infrared information acquisition technology of Chinese ocean color and temperature scanner of HY-1 satellite. National Remote Sensing Bulletin,2022,26(8):1589—1601. (in Chinese)
- [4] 康旭刚,韩雨,刘晓宇,等. 无人机低空遥感矿山地质灾害监测研究进展及发展趋势. 金属矿山,2023(1):17—29.
Lian XG,Han Y,Liu XY,et al. Study progress and development trend of mine geological disaster monitoring by UAV Low-altitude Remote Sensing. Metal Mine,2023(1):17—29. (in Chinese)
- [5] Bushnaq OM,Mishra D,Natalizio E,et al. Unmanned aerial vehicles (UAVs) for disaster management. Nanotechnology-Based Smart Remote Sensing Networks for Disaster Prevention. Amsterdam:Elsevier,2022:159—188.
- [6] 张晓飞,吕中虎,孟庆佳,等. 基于物联网和弱反射光栅阵列的地质灾害监测系统设计与应用. 现代电子技术,2025,48(1):144—150.
Zhang XF,Lv ZH,Meng QJ,et al. Design and application of geological disaster monitoring system based on IoT and weak-reflection fiber grating array. Modern Electronics Technique,2025,48(1):144—150. (in Chinese)
- [7] 姚宇,禹胜林. 基于光散射原理的雨量传感器灵敏度的研究. 电子器件,2022,45(2):450—454.
Yao Y,Yu SL. Research on the sensitivity of rain sensor based on the principle of light scattering. Chinese Journal of Electron Devices, 2022,45(2):450—454. (in Chinese)
- [8] 张磊,巨能攀,何朝阳,等. 滑坡裂缝计时序数据实时异常检测分析. 岩石力学与工程学报,2024,43(1):206—215.
Zhang L,Ju NP,He CY,et al. Real-time anomaly detection and analysis of time series data for crack gauge in landslides. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(1):206—215. (in Chinese)
- [9] 王莹,孙晨晨,张路,等. 无人机探地雷达对水体和空洞的探测应用研究. 煤田地质与勘探,2025,53(5):207—216.
Wang Y,Sun CC,Zhang L,et al. Application of a UAV-borne GPR system in the detection of water bodies and cavities. Coal Geology & Exploration,2025,53(5):207—216. (in Chinese)

- [10] 李晓萌,陈天,徐伟铎,等. 基于数字孪生的海底地质灾害监测预警技术研究. 中国海洋大学学报(自然科学版),2024,54(5):102—114.
Li XM,Chen T,Xu WD,et al. Research on submarine geohazard monitoring and early warning technology based on digital twin. Periodical of Ocean University of China,2024,54(5):102—114. (in Chinese)
- [11] 刘宇佳,王柯霖,程健森. 海洋地质灾害原位监测技术研究进展. 水上安全,2023(5):65—67.
Liu YJ,Wang KL,Cheng JS. Research progress on the in-situ monitoring technologies of marine geohazards. Maritime Safety,2023(5):65—67. (in Chinese)
- [12] 杨坤,徐卫亚,孟永东,等. 滑坡地下渗流流速的光纤光栅监测装置研发. 三峡大学学报(自然科学版),2024,46(2):1—7.
Yang K,Xu WY,Meng YD,et al. Research and development of landslide seepage monitoring device based on fiber bragg grating. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences),2024,46(2):1—7. (in Chinese)
- [13] Gong HK,Kizil MS,Chen ZW,et al. Advances in fibre optic based geotechnical monitoring systems for underground excavations. International Journal of Mining Science and Technology,2019,29(2):229—238.
- [14] 辛鲁斌,韩玲,李良志. 基于多源数据融合的滑坡智能识别. 地球科学与环境学报,2023,45(4):920—928.
Xin LB,Han L,Li LZ. Landslide intelligent recognition based on multi-source data fusion. Journal of Earth Sciences and Environment,2023,45(4):920—928. (in Chinese)
- [15] 张小曳,李泽椿,端义宏. 自然灾害风险防控科技支撑体系发展战略研究. 北京:气象出版社,2021:105.
Zhang XY,Li ZC,Duan YH. Research on the Development Strategy of a Scientific and Technological Support System for Natural Disaster Risk Prevention and Control. Beijing:China Meteorological Press,2021:105. (in Chinese)
- [16] 张坤,穆穆,王强. 数值模式在海洋观测设计中的重要作用:回顾与展望. 中国科学(地球科学),2021,51(5):653—665.
Zhang K,Mu M,Wang Q. Increasingly important role of numerical modeling in oceanic observation design strategy:A review. Scientia Sinica(Terrae),2021,51(5):653—665. (in Chinese)
- [17] 许强,朱星,李为乐,等. “天-空-地”协同滑坡监测技术进展. 测绘学报,2022,51(7):1416—1436.
Xu Q,Zhu X,Li WL,et al. Technical progress of space-air-ground collaborative monitoring of landslide. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2022,51(7):1416—1436. (in Chinese)
- [18] 徐靛,程刚,朱鸿鹄. 基于空天地内一体化的滑坡监测技术研究. 激光与光电子学进展,2021,58(9):98—111.
Xu L,Cheng G,Zhu HH. Research review of landslide monitoring methods based on integration of space-air-ground-interior. Laser & Optoelectronics Progress,2021,58(9):98—111. (in Chinese)
- [19] 连志鹏,陈宇,章昱,等. 普适型滑坡地质灾害监测预警——以湖南省溆浦县为例. 中国地质调查,2025,12(1):140—149.
Lian ZP,Chen Y,Zhang Y,et al. Universal monitoring and early warning for landslide geological hazard:A case study of Xupu County in Hunan Province. Geological Survey of China,2025,12(1):140—149. (in Chinese)
- [20] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策. 岩石力学与工程学报,2012,31(10):1945—1956.
Qian QH. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(10):1945—1956. (in Chinese)
- [21] 许强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(11):1651—1659.
Xu Q. Understanding and consideration of related issues in early identification of potential geohazards. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2020,45(11):1651—1659. (in Chinese)
- [22] 邓李政,袁宏永,张鸣之,等. 滑坡变形监测预警技术研究进展. 清华大学学报(自然科学版),2023,63(6):849—864.
Deng LZ,Yuan HY,Zhang MZ,et al. Research progress on landslide deformation monitoring and early warning technology. Journal of Tsinghua University (Science and Technology),2023,63(6):849—864. (in Chinese)
- [23] 熊江,唐川,陈明. 泥石流早期识别与监测预警研究进展探讨. 自然灾害学报,2021,30(1):165—173.
Xiong J,Tang C,Chen M. Discussion on the research progress of early identification,monitoring and early warning of debris flow. Journal of Natural Disasters,2021,30(1):165—173. (in Chinese)
- [24] 朱淳,龚逸非,宋盛渊,等. 滑坡多源监测技术及预警模型研究进展与展望. 西南交通大学学报,2024:1—19.
Zhu C,Gong YF,Song SY,et al. Progress and prospects of landslide multi-source monitoring technology and early warning model. Journal of Southwest Jiaotong University,2024:1—19. (in Chinese)
- [25] 贾永刚,陈天,李培英,等. 海洋地质灾害原位监测技术研究进展. 中国地质灾害与防治学报,2022,33(3):1—14.
Jia YG,Chen T,Li PY,et al. Research progress on the in-situ monitoring technologies of marine geohazards. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2022,33(3):1—14. (in Chinese)
- [26] 申艳军,彭建兵,贾永刚,等. 海底地质灾害发育特征与监测技术研究现状及展望. 中国工程科学,2023,25(3):95—108.
Shen YJ,Peng JB,Jia YG,et al. Research status and prospect of development characteristics and monitoring techniques of submarine geological hazards. Strategic Study of CAE,2023,25(3):95—108. (in Chinese)
- [27] Khan A,Gupta S,Gupta SK. Multi-hazard disaster studies:Monitoring,detection,recovery,and management,based on emerging technologies and optimal techniques. International Journal of Disaster Risk Reduction,2020,47:101642.
- [28] 甘卫军. 中国大陆地壳运动GPS观测技术进展与展望. 城市与减灾,2021(4):39—44.
Gan WJ. Progress and prospect on GPS observation technology of Crustal Movement in China. City and Disaster Reduction,2021(4):39—44. (in Chinese)
- [29] 国家地震科学数据中心. 中国台网基本信息. (2025-07-31)/[2025-07-31]. https://data.earthquake.cn/datashare/website/data/datashare_network_china.jsp.
- [30] 梁姗姗,邹立晔,赵博,等. 中国测震台网地震监测能力初步分析. 地震地磁观测与研究,2021,42(6):68—75.
Liang SS,Zou LY,Zhao B,et al. Preliminary analysis of seismic monitoring capability of China Seismic Network. Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2021,42(6):68—75. (in Chinese)
- [31] Liu T,Wei GL,Kou HL,et al. Pore pressure observation:Pressure

- response of probe penetration and tides. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(7): 107—113.
- [32] 董胜, 廖振焜, 于立伟, 等. 海洋科考装备技术发展战略研究. *中国工程科学*, 2023, 25(3): 33—41.
- Dong S, Liao ZK, Yu LW, et al. Development strategy for marine scientific equipment and technologies. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(3): 33—41. (in Chinese)
- [33] 孙志文, 贾永刚, 权永峥, 等. 复杂深海工程地质原位长期监测系统研发与应用. *地学前缘*, 2022, 29(5): 216—228.
- Sun ZW, Jia YG, Quan YZ, et al. Development and application of long-term in situ monitoring system for complex deep-sea engineering geology. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(5): 216—228. (in Chinese)
- [34] 张鑫, 李超伦, 李连福. 深海极端环境原位探测技术研究现状与对策. *中国科学院院刊*, 2022, 37(7): 932—938.
- Zhang X, Li CL, Li LF. In situ detection technology for deep sea extreme environment: Research status and strategies. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(7): 932—938. (in Chinese)
- [35] 马蕊, 赵修涛, 柳存根. 海洋水下立体观测技术装备发展研究. *中国工程科学*, 2020, 22(6): 19—25.
- Ma R, Zhao XT, Liu CG. Development of marine equipment for underwater stereoscopic observation. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(6): 19—25. (in Chinese)
- [36] 王军成, 孙继昌, 刘岩, 等. 我国海洋监测仪器装备发展分析及展望. *中国工程科学*, 2023, 25(3): 42—52.
- Wang JC, Sun JC, Liu Y, et al. Research progress and prospect of marine monitoring instruments and equipment in China. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(3): 42—52. (in Chinese)
- [37] Liu XL, Lu Y, Yu HY, et al. *In-situ* observation of storm-induced wave-supported fluid mud occurrence in the subaqueous Yellow River Delta. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127(7): e2021JC018190.
- [38] 殷跃平, 王文沛, 邢爱国, 等. 海底滑坡动力侵蚀机理研究: 回顾与展望. *中国地质灾害与防治学报*, 2025, 36(1): 1—15.
- Yin YP, Wang WP, Xing AG, et al. Research on dynamic erosion mechanism of submarine landslide: Review and prospects. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2025, 36(1): 1—15. (in Chinese)
- [39] 孙福洋, 李晓松, 李增元, 等. 近实时中高空间分辨率森林火灾监测系统展望. *遥感学报*, 2020, 24(5): 543—549.
- Sun FY, Li XS, Li ZY, et al. Near-real-time forest fire monitoring system with medium and high spatial resolutions. *National Remote Sensing Bulletin*, 2020, 24(5): 543—549. (in Chinese)
- [40] 覃先林, 李晓彤, 刘树超, 等. 中国林火卫星遥感预警监测技术研究进展. *遥感学报*, 2020, 24(5): 511—520.
- Qin XL, Li XT, Liu SC, et al. Forest fire early warning and monitoring techniques using satellite remote sensing in China. *National Remote Sensing Bulletin*, 2020, 24(5): 511—520. (in Chinese)
- [41] Plank S, Fuchs EM, Frey C. A fully automatic instantaneous fire hotspot detection processor based on AVHRR imagery—a TIMELINE thematic processor. *Remote Sensing*, 2017, 9(1): 30.
- [42] Briones-Herrera CI, Vega-Nieva DJ, Monjarás-Vega NA, et al. Near real-time automated early mapping of the perimeter of large forest fires from the aggregation of VIIRS and MODIS active fires in Mexico. *Remote Sensing*, 2020, 12(12): 2061.
- [43] Justice CO, Giglio L, Korontzi S, et al. The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 244—262.
- [44] Melchiorre A, Boschetti L. Global analysis of burned area persistence time with MODIS data. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 750.
- [45] Li JW, Wan JL, Sun L, et al. Intelligent segmentation of wildfire region and interpretation of fire front in visible light images from the viewpoint of an unmanned aerial vehicle (UAV). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2025, 220: 473—489.
- [46] Krishnamoorthy M, Asif M, Kumar PP, et al. A design and development of the smart forest alert monitoring system using IoT. *Journal of Sensors*, 2023, 2023(1): 8063524.
- [47] Cao XH, Su YX, Geng X, et al. YOLO-SF: YOLO for fire segmentation detection. *IEEE Access*, 2023, 11: 111079—111092.
- [48] Zhang PZ, Ban YF, Nascetti A. Learning U-Net without forgetting for near real-time wildfire monitoring by the fusion of SAR and optical time series. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 261: 112467.
- [49] 段四波, 茹晨, 李召良, 等. Landsat卫星热红外数据地表温度遥感反演研究进展. *遥感学报*, 2021, 25(8): 1591—1617.
- Duan SB, Ru C, Li ZL, et al. Reviews of methods for land surface temperature retrieval from Landsat thermal infrared data. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(8): 1591—1617. (in Chinese)
- [50] Kanakaraja P, Syam Sundar P, Vaishnavi N, et al. IoT enabled advanced forest fire detecting and monitoring on Ubidots platform. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46: 3907—3914.
- [51] Dampage U, Bandaranayake L, Wanasinghe R, et al. Forest fire detection system using wireless sensor networks and machine learning. *Scientific Reports*, 2022, 12: 46.
- [52] Mohsan SAH, Othman NQH, Li YL, et al. Unmanned aerial vehicles (UAVs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. *Intelligent Service Robotics*, 2023, 16(1): 109—137.
- [53] 王丽霞, 夏雪, 高凡, 等. 深度学习在森林火灾检测中的研究进展. *林产工业*, 2023, 60(11): 88—92.
- Wang LX, Xia X, Gao F, et al. Research progress of deep learning in forest fire detection. *China Forest Products Industry*, 2023, 60(11): 88—92. (in Chinese)
- [54] 朱兴华, 彭建兵, 同霄, 等. 黄土地区地质灾害链研究初探. *工程地质学报*, 2017, 25(1): 117—122.
- Zhu XH, Peng JB, Tong X, et al. Preliminary research on geological disaster chains in loess area. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(1): 117—122. (in Chinese)
- [55] Xu LF, Meng XW, Xu XG. Natural hazard chain research in China: A review. *Natural Hazards*, 2014, 70(2): 1631—1659.
- [56] 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. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(7): 957—966.
- Xu Q, Dong XJ, Li WL. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 957—966. (in Chinese)
- [57] 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考. *工程地质学报*, 2020, 28(2): 360—374.
- Xu Q. Understanding the landslide monitoring and early warning: Consideration to practical issues. *Journal of Engineering Geology*,

- 2020,28(2):360—374. (in Chinese)
- [58] 窦林名,李振雷,张敏. 煤矿冲击地压灾害监测预警技术研究. 煤炭科学技术,2016,44(7):41—46.
- Dou LM,Li ZL,Zhang M. Study on monitoring and early warning technology of mine pressure bump disaster. Coal Science and Technology,2016,44(7):41—46. (in Chinese)
- [59] Ye X,Zhu HH,Wang J,et al. Subsurface multi-physical monitoring of a reservoir landslide with the fiber-optic nerve system. Geophysical Research Letters,2022,49(11):e2022GL098211.
- [60] 施斌,朱鸿鹄,张诚成,等. 岩土体灾变感知与应用. 中国科学(技术科学),2023,53(10):1639—1651.
- Shi B,Zhu HH,Zhang CC,et al. Rock and soil disaster sensing and application. Scientia Sinica (Technologica),2023,53(10):1639—1651. (in Chinese)

The Monitoring Technology System of Natural Disaster

Qiang Xu^{1†*} Honghu Zhu^{2†} Xing Zhu^{1*} Xiaolei Liu³
Chen Yu⁴ Chong Xu⁵ Daoyuan Tan² Tao Li⁵

1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China
3. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
4. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China
5. National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China

Abstract Under the intensifying compound chain risks of natural disasters driven by global climate change, China urgently needs to establish a precise and efficient modern monitoring technology system. This paper proposes a “theoretical-technological-national” trinity framework for natural disaster monitoring. Theoretically, by developing a multi-hazard coupling index system and intelligent fusion theory for heterogeneous multi-source data, it overcomes the bottlenecks in characterizing disaster chain evolution mechanisms and perception. Technologically, breakthroughs in multi-dimensional collaborative monitoring (integrating space-air-ground-sea platforms), cloud-edge-device interconnected architecture, and extreme-environment equipment achieve comprehensive spatial coverage and high-precision sensing. Nationally, implementing the “National Deformation Map” InSAR satellite program, nationwide LiDAR-based 3D modeling, and multi-stakeholder data sharing mechanisms significantly enhances dynamic disaster chain simulation and short-term warning capabilities. This integrated framework systematically resolves five key challenges—including information silos and inadequate spatial coverage—while providing scientific and technological support for safeguarding national security.

Keywords natural disasters; fusion perception theory; collaborative monitoring technology; data standards and specifications; sharing and common-use mechanisms

许 强 成都理工大学教授、博士生导师,现任成都理工大学校长。主要从事地质灾害变形破坏理论与防治技术研究,研究成果聚焦于滑坡成因机理、早期识别与监测预警等方面,并在国土防灾、藏中联网、川藏铁路等工程中获得重要应用。获国家科学技术进步奖一等奖2项、二等奖1项。

朱鸿鹄 南京大学教授、博士生导师,现任南京大学大地探测与感知研究院院长。主要从事地质工程监测预警技术研究,研究成果聚焦于工程地质界面多元表征、灾变机理与地质灾害智能预测等方面并在长江三峡库区滑坡防治、汶川震区泥石流预警、珠三角水资源配置工程健康诊断等重大工程中得到重要应用。

朱 星 成都理工大学研究员、博士生导师。主要从事地质灾害智能监测预警关键技术与仪器研究,研究成果聚焦于地质灾害突变过程智能感知监测技术、智能物联网监测仪器、前兆预警模型和边缘计算预警装置等方面,并多次成功预警大型地质灾害。获国家科学技术进步奖二等奖1项。

(责任编辑 贾祖冰 张 强)

† Contributed equally as co-first authors.

* Corresponding Authors, Email: xq@cdut.edu.cn; zhuxing15@cdut.edu.cn