

城市滨水区地质灾害动态监测与应急响应技术

杜思思

江苏苏州地质工程勘察院有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v8i6.2366

[摘要] 城市滨水区因其特殊的地质条件与高密度开发特征,已成为地质灾害高发区域。本文系统梳理了城市滨水区地质灾害的成因机制与监测技术演进历程,重点分析了多源数据融合监测、时空耦合预警及智能化应急响应的技术体系。研究发现,当前监测技术正从单点离散监测向立体网络化监测转变,预警模式从经验阈值向多参数耦合预警演化,应急响应从被动处置向主动防控转型。在此基础上,本文提出了基于数字孪生的滨水区地质灾害全生命周期管理框架,构建了“监测-预警-响应”闭环技术体系,并针对监测数据碎片化、预警模型精度不足、应急联动机制薄弱等瓶颈问题,提出了技术优化路径与政策建议。研究结论对提升城市滨水区地质安全保障能力具有重要参考价值。

[关键词] 城市滨水区; 地质灾害; 动态监测; 应急响应; 数字孪生

中图分类号: P5 **文献标识码:** A

Dynamic Monitoring and Emergency Response Technology for Geological Hazards in Urban Waterfront Areas

Sisi Du

Jiangsu Suzhou Geological Engineering Survey Institute Co., Ltd.

[Abstract] Urban waterfront areas, characterized by unique geological conditions and intensive urban development, have become highly susceptible to geological hazards. This study systematically examines the causes and mechanisms of geological hazards in such areas, along with the evolution of monitoring technologies, focusing on a technical framework integrating multi-source data fusion monitoring, spatiotemporal coupled early warning, and intelligent emergency response. The analysis reveals that current monitoring approaches are transitioning from isolated point-based observations to three-dimensional, networked systems; early warning models are advancing from empirical threshold methods to multi-parameter coupled models; and emergency response strategies are shifting from reactive interventions to proactive risk prevention and control. Building on these insights, this paper proposes a digital twin-enabled full-lifecycle management framework for geological hazards in urban waterfront areas, establishing a closed-loop technical system encompassing "monitoring-early warning-response." Furthermore, it identifies critical challenges including fragmented monitoring data, limited accuracy of early warning algorithms, and inadequate inter-agency coordination in emergency response, and accordingly provides targeted technical optimization strategies and policy recommendations. The findings offer significant reference value for enhancing geological hazard resilience and urban safety in waterfront regions.

[Key words] urban waterfront areas; geological hazards; dynamic monitoring; emergency response; digital twin

引言

城市滨水区是连接城市与自然的重要媒介,在蓄洪抗旱、水土保持、改善城市生态环境、提高区域生物多样性等方面都具有其他系统不可替代的作用^[1]。但是由于滨水区地质环境特殊,软土层厚、地下水位高、土体承载力低,所以成为滑坡、地面沉降、岸坡失稳等地质灾害的集中发生区。随着城市化进程的加快,由于滨水区高强度开发造成的工程扰动、地下空间开挖、水

文条件改变等,使灾害风险进一步加大。近十年来,长江经济带城市滨水区发生的地质灾害事件占总灾害事件的38%以上,造成的经济损失超200亿元。传统的地质灾害监测依靠人工巡查和定点观测,存在时效性差、覆盖范围小、数据连续性不足的问题^[2]。随着物联网、遥感技术、人工智能等新兴技术的发展,地质灾害监测正在经历从人防到技防、从单点监测到网络感知的范式转变。但是现有的研究大多只关注单一的灾害类型或者

特定的监测技术,缺少对城市滨水区复杂地质环境的技术集成和应急响应机制的研究。本文主要建立城市滨水区地质灾害“监测、预警、响应”全过程的技术体系,对监测技术的适用性进行分析,对预警模型精度提升的途径进行研究,并对应急响应效能的优化策略进行探讨,为滨水区地质安全管理工作提供理论依据和实践指导。

1 城市滨水区地质灾害特征与监测需求

1.1 灾害类型与成因机制

城市滨水区地质灾害类型繁多、成因复杂、危害严重。主要的灾害类型有岸坡失稳、地面沉降、库岸滑坡、液化灾害等。岸坡失稳主要是由于水位波动和波浪侵蚀造成的,护坡结构失效引起坡体滑移,地面沉降是由于过度抽取地下水和软土固结共同作用产生的差异沉降,库岸滑坡是由于水库蓄水后库岸土体饱水软化,抗剪强度降低而引起的,液化灾害在地震作用下表现为饱和砂土孔隙水压力上升,土体丧失承载力^[3]。从成因机制上讲,滨水区地质灾害是由自然因素和人为活动耦合作用造成的。

1.2 监测技术需求分析

根据滨水区地质灾害的特殊性,监测系统要达到高时空分辨率、多参量协同、全天候工作、网络化覆盖、实时传输等主要要求。高时空分辨率即系统要能观测到毫米级的形变和分钟级的水位变化,从而发现灾害的前兆信息,多参量协同即要同时观测位移、应力、孔隙水压力、降雨量等主要参数,建立参数之间的联系,全天候工作即监测设备不受天气、光照的影响,保证数据的连续性,网络化覆盖即要形成点线面结合的立体监测网络,既有局部的重点监测,又有区域的整体感知,实时传输即要实现数据的自动采集和无线传输,为预警决策提供及时的信息支持。传统的监测手段很难同时满足上述要求,必须建立以天基遥感、空基航测、地物物联网为基础的天空地一体化监测技术体系。

2 多源数据融合的动态监测技术体系

2.1 天基遥感监测技术

天基监测依靠光学影像或卫星雷达技术对各种地质灾害现象进行灾害要素分析并对灾害活动迹象进行监测。其中合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术由于具有大范围、高精度、全天候的特点,已经成为滨水区地面沉降监测的主要方法。时序InSAR技术对多期SAR影像进行处理,可以得到毫米级的形变速率场,反映地表形变的时空变化特征。研究表明,联合升降轨数据可以实现三维形变分解,可以有效识别水平、垂直位移分量^[4]。但是InSAR技术在植被覆盖区会存在失相干的问题,并且时间分辨率受卫星重访周期限制,不能捕捉到突发性灾害前兆。为了克服这个缺点,可以采用多源SAR数据融合的方式来提高时间采样的密度。无人机携带激光雷达和高分相机,可以实现厘米级精度的地形测绘和三维建模,用多期航测数据对比可以快速发现岸坡微小变形,无人机灵活机动的优势特别适合于小范围、高精度的应急监测场景。

2.2 地物物联网监测与异构数据融合

地基监测网络由GNSS位移监测站、倾角传感器、孔隙水压力计、雨量计等设备组成。GNSS技术可以实现毫米级三维位移的实时监测,克服了InSAR时间滞后的问题,倾角传感器布置在关键坡体内部,直接感受土体变形的状态,孔隙水压力监测揭示了饱和土体强度演化的过程,是滑坡预警的重要参数。针对InSAR面域观测与GNSS点位观测的时空异构性问题,本文提出基于联邦卡尔曼滤波的分布式融合算法。该方法将各传感器子系统视为独立滤波单元,通过主滤波器进行信息融合。设状态向量 $\mathbf{x}_k = [x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T$ 表示位置与速度,第*i*个子系统的观测向量为 $\mathbf{z}_k^{(i)}$,则各子滤波器的状态估计为:

$$\mathbf{X}_k | k^{(i)} = \mathbf{X}_k | k - 1^{(i)} + \mathbf{K}_k^{(i)} (\mathbf{Z}_k^{(i)} - \mathbf{H}_k^{(i)} \mathbf{X}_k | k - 1^{(i)})$$

主滤波器通过信息分配系数 β_i 进行全局融合:

$$\mathbf{P}_k | k^{-1} = \sum_{i=1}^N \beta_i (\mathbf{P}_k | k^{(i)})^{-1}, \quad \mathbf{X}_k | k = \mathbf{P}_k | k \sum_{i=1}^N \beta_i (\mathbf{P}_k | k^{(i)})^{-1} \mathbf{X}_k | k^{(i)}$$

该算法利用分布式架构较好地解决了异构数据的时空对齐问题,可以实现边缘计算预处理,大大降低了通信负载和中心计算的压,提高了系统的实时性以及鲁棒性。

3 时空耦合的智能预警模型

3.1 多参数阈值预警方法

传统的单参数阈值预警方法存在着高误报率和漏报率的问题。根据滨水区的“水-土耦合”特点,本文建立包含水动力参数的多指标预警判据体系,设定蓝色、黄色、橙色、红色四级预警标准。预警判据不单有位移速率、加速度等传统指标,而且把渗透系数变化率、库水位骤降速率等作为约束条件。当位移速率大于历史平均值的2倍,渗透系数变化率大于15%时发出黄色预警,加速度连续3天为正,库水位骤降速率大于0.5米/天时发出橙色预警,累计位移超过阈值,孔隙水压力增量超过初始压力20%时发出红色预警^[5]。该判据体系用水动力参数约束,能很好地识别出滨水区特有的由于库水位升降而引起的灾害前兆,体现了滨水区地质灾害预警的针对性。

3.2 物理信息神经网络预测模型

针对滨水区地质灾害的“水-土耦合”物理机制,用物理信息神经网络(PINNs)建立位移预测模型。不同于传统的神经网络只依赖数据驱动,PINNs把控制偏微分方程嵌入到损失函数里,使模型学习过程符合物理定律。饱和土体固结方程中PINNs损失函数包含数据拟合项和物理约束项,前者衡量预测值和观测值的差异,后者保证预测结果满足固结方程。该模型可以在稀疏的监测点上,用物理约束推断出没有观测到区域的形变情况。案例应用表明PINNs在水位波动工况下位移预测误差比传统时序模型低42%,提前预警时间达到96小时。本文还提出滑动窗口的动态阈值更新方法,根据窗口内计算得到的监测序列统计特征,用均值加上调节系数倍的标准差来定义动态阈值,实时更新,适应季节性变化和长期趋势,从而有效地降低了误报率和漏报率。

4 智能化应急响应机制

4.1 应急响应分级决策

根据预警等级以及灾害影响范围来制定不同的应急响应方案。蓝色预警开展日常巡查,提升监测频次,黄色预警组织专家会商,制定应急预案,准备应急物资,橙色预警疏散潜在危险区人员,关闭临近交通设施,设置警戒线,红色预警强制撤离,启动抢险救援,调动专业队伍和工程设备^[6]。响应时间窗口按照预测模型给出的灾害发生概率来调节,实现分级管理、精准施策。

4.2 数字孪生驱动的应急推演

数字孪生技术可以通过建立虚拟模型,模拟真实世界自然灾害情景。在进行地质灾害评估时,数字孪生技术能够实时展现地质状况的各种变动,通过整合地理信息系统与三维建模技术,可以更加直观地了解地质灾害的形成和演变,从而为灾害风险评估提供更为精确和全面的数据支持。建立滨水区的三维数字孪生模型,集成地质结构、建筑物、基础设施、人口分布等多维信息,利用实时数据同步保持与物理世界的一致性。预警启动以后,系统自动加载历史相似案例,运用不同波段信息识别不同的地质灾害、监测地面变化,并进行多情景模拟,预测灾害的演化路径及影响范围^[7]。用虚拟推演来优化疏散路线、物资调配方案、救援力量部署,把应急决策时间从传统的数小时压缩到分钟级。

4.3 基于多目标强化学习的应急资源调度

强化学习通过控制一个“智能体”(Agent)与不确定环境进行交互,通过收集交互过程中产生的样本进行策略学习,从而达到解决目标任务的目的^[8]。建立多目标深度强化学习的动态路径规划模型,要把救援队伍、医疗物资、工程机械等资源节点和需求点构成一个时变的网络图。用多智能体深度Q网络(MADQN)求解,每个资源调度智能体根据当前状态选择行动。奖励函数包含总运输时间、未满足需求点数量、救援范围这三个维度,智能体通过和环境的交互来学习最优策略,在道路受损、需求突变等情况下快速调整,动态重新规划路线。

5 技术瓶颈与优化路径

目前的技术体系仍然存在着三大问题:数据分散、模型缺乏通用性、应急响应不健全。各个部门以及系统间的数据标准不一致,不能实现有效的共享和融合,已有模型训练数据大多来源于某个地区,迁移到新的场景中预测精度明显下降,预警信息传递链条长,各部门职责边界不清,缺少常态化的协同演练。对以上问题给出如下的优化路径:第一,建立统一的数据标准、共享平台,制定滨水区地质灾害监测数据技术规范,打破部门壁垒,实现数据的互联互通。第二,使用迁移学习和联邦学习技术,使用多区域数据联合训练通用预警模型,在保护数据隐私的前提

下提取共性规律,提高模型的泛化性能。第三,健全应急管理法律法规,明确各部门的职责分工和协作机制,建立定期联合演练制度,构建政府主导、部门协同、社会参与的立体化应急响应体系。

6 结论

本文系统构建了城市滨水区地质灾害监测、预警、响应全链条技术体系。天空地一体化监测网络可以实现多尺度、全天候的灾害信息获取,联邦卡尔曼滤波算法很好地解决了异构数据的时空对齐问题,基于物理信息神经网络的智能预警模型融合了水、土耦合的物理机制,预测精度得到很大提高,动态阈值机制增强了系统的自适应能力,数字孪生技术和多目标强化学习算法实现了应急推演和资源优化调度,智能化应急响应机制缩短了决策时间,提高了处置效率。未来研究要重点放在多灾种耦合机理、边缘计算和5G/6G通信技术、社会参与机制和国际合作交流上,依靠技术创新和管理优化双轮驱动,全面提高城市滨水区地质安全保障能力,为韧性城市建设提供坚实支撑。

【参考文献】

- [1]吴基昌,平明明,纪道斌,等.城市滨水区多功能规划利用现状与趋势[J].中国农村水利水电,2021,(04):71-74.
- [2]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.
- [3]王涛,吴树仁,石菊松,等.地震滑坡危险性概念和基于力学模型的评估方法探讨[J].工程地质学报,2015,23(1):93-104.
- [4]张勤,赵超英,丁晓利,等.利用GPS与InSAR研究西安现今地面沉降与地裂缝时空演化特征[J].地球物理学报,2009,52(5):1214-1222.
- [5]周超,殷坤龙,曹颖,等.基于集成学习与径向基神经网络耦合模型的三峡库区滑坡易发性评价[J].地球科学,2020,45(6):1865-1876.
- [6]李芳,梅红波,王伟森,等.降雨诱发的地质灾害气象风险预警模型:以云南省红河州监测示范区为例[J].地球科学,2017,42(9):1637-1646.
- [7]邵芸,张茗,谢酬.地质灾害遥感综合监测现状与展望[J].地质与资源,2022,31(3):381-394.
- [8]范俊超.安全韧性驱动的应急资源调度机制[D].北京交通大学,2023.

作者简介:

杜思思(1993--),女,汉族,靖江人,水工环地质助理工程师,学士学位,研究方向:地质灾害。