

基于GNSS与分布式光纤传感的滑坡实时形变监测与早期预警研究

凡 净^{1,2*}, 潘骏琪³, 刘施诗¹, 张 欢¹, 周世猜¹

¹昭通学院地理科学与旅游学院, 云南 昭通

²昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明

³云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2025年8月29日; 录用日期: 2025年10月16日; 发布日期: 2025年10月27日

摘 要

滑坡灾害的早期识别与实时预警是地质灾害防治领域的关键重点。传统监测方法受限于空间分辨率与实时性, 难以有效捕捉滑坡多尺度变形过程。本文以云南省小龙洞滑坡为研究对象, 构建了一套融合全球导航卫星系统(GNSS)与分布式光纤传感技术(Fiber Bragg Grating, FBG)的多尺度实时形变监测与预警系统。通过建立“区域-主体-关键点”三级监测体系, 实现了从宏观地表位移至微观应变响应的全断面协同感知。本文基于多源异构数据的实时采集与高精度融合技术, 根据自适应卡尔曼滤波算法实现了GNSS绝对位移与FBG应变数据的时空统一与联合建模, 并结合长短期记忆网络(LSTM)与多指标阈值机制, 建立了位移速率、应变突变与时空关联特征协同的多级预警模型。系统实际运行表明, 其可有效识别区域背景位移、主体蠕变与局部应变异常, 预警响应延迟小于3分钟, 历史预警准确率达93%, 灾害识别时效性提升72%。现场实测结果验证GNSS与光纤传感融合技术在滑坡灾害早期预警中的有效性, 为复杂地质环境下的多尺度监测提供了可靠的技术支撑。

关键词

GNSS, 分布式光纤传感, 滑坡监测, 多尺度感知, 预警模型, 小龙洞滑坡

Real-Time Deformation Monitoring and Early Warning of Landslides Using GNSS and Distributed Fiber Optic Sensing

Jing Fan^{1,2*}, Junqi Pan³, Shishi Liu¹, Huang Zhang¹, Shicai Zhou¹

¹School of Geographic Science and Tourism, Zhaotong University, Zhaotong Yunnan

²School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

*通讯作者。

文章引用: 凡净, 潘骏琪, 刘施诗, 张欢, 周世猜. 基于GNSS与分布式光纤传感的滑坡实时形变监测与早期预警研究[J]. 地理科学研究, 2025, 14(5): 1119-1133. DOI: 10.12677/gser.2025.145107

Abstract

The early identification and real-time warning of landslide hazards represent critical priorities in the field of geological disaster prevention and mitigation. Conventional monitoring methods are often limited by spatial resolution and real-time performance, making it difficult to effectively capture the multi-scale deformation processes of landslides. This study takes the Xiaolongdong landslide in Yunnan Province as a case study and develops an integrated multi-scale real-time deformation monitoring and early warning system that combines Global Navigation Satellite System (GNSS) and Fiber Bragg Grating (FBG)-based distributed fiber optic sensing technology. By establishing a three-level monitoring system, the system achieves coordinated full-section perception from macroscopic surface displacement to microscopic strain response. Based on real-time acquisition and high-precision fusion of multi-source heterogeneous data, spatiotemporal unification and joint modeling of GNSS absolute displacement and FBG strain data are accomplished using an adaptive Kalman filtering algorithm. Furthermore, a multi-level early warning model is established by integrating Long Short-Term Memory (LSTM) networks and a multi-index threshold mechanism, which incorporates displacement rate, abrupt strain changes, and spatiotemporal correlation features. System operation results demonstrate that the system can effectively identify regional background displacement, main body creep, and local strain anomalies, with a warning response delay of less than 3 minutes, a historical warning accuracy rate of 93%, and a 72% improvement in disaster identification timeliness. Field measurements verify the effectiveness of the integrated GNSS and fiber optic sensing technology in early landslide warning, providing reliable technical support for multi-scale monitoring in complex geological environments.

Keywords

GNSS, Distributed Fiber Optic Sensing, Landslide Monitoring, Multi-Scale Perception, Early Warning Model, Xiaolongdong Landslide

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

滑坡灾害因其突发性和强破坏性是地质灾害防治工作的重点与难点[1]-[3]。传统单点式监测手段受限于空间覆盖范围有限与采样频率不足,难以实现对滑坡从孕育到启动的全过程、多尺度形变信息的有效捕捉,制约了早期预警能力的提升[4]-[6]。近年来,随着传感技术的发展,多源监测技术融合为滑坡监测预警提供了新的思路。全球导航卫星系统(GNSS)能够获取地表毫米级精度的绝对位移信息,但在刻画深部变形机制方面存在局限;分布式光纤传感(Fiber Bragg Grating, FBG)技术凭借其抗电磁干扰、耐腐蚀和可分布式测量等优势,可实现岩土体内部应变与温度参数的高分辨率、长距离连续监测,尤其适用于潜在滑带识别与变形机理分析[7]-[9]。GNSS 与 FBG 的协同应用可突破单一监测手段的局限,构建“空-天-地”一体化的立体监测网络,可显著提高预警的时效性与准确性。

近年来,多源监测技术融合已成为滑坡监测领域的重要研究方向,全球导航卫星系统(GNSS)与分布

式光纤传感(FBG)技术的联合应用显示出显著优势。Wang 等研究发现 GNSS 技术能够提供地表毫米级精度的绝对位移监测数据,而 FBG 凭借其对于温度与应变的高敏感性、抗电磁干扰及长距离分布式测量能力,可有效获取岩土体内部变形信息[10]。Peng 等研究发现 GNSS 通过接收卫星信号可实现地表毫米级精度的绝对位移监测,具有覆盖范围广、自动化程度高等优点,尤其适用于滑坡体表面位移场的长期、大范围观测[11]。与之相比,Han 等研究发现 FBG 技术基于光栅波长偏移机制,对应变与温度变化极为敏感,具备抗电磁干扰、耐腐蚀和可实现长距离分布式测量等特点,能够有效获取岩土体内部变形信息,揭示深部滑带的变形机制[12]。朱鸿鹄等在三峡藕塘滑坡中布设 FBG 传感网络,成功识别出浅层次级滑面,揭示了降雨入渗过程中热-水-力多场耦合的变形响应机制[13];李荟等进一步指出,多源数据融合是提升地质灾害预警准确性与可靠性的核心途径[14]。童广勤团队在三峡库区滑坡监测中布设超弱光纤光栅阵列(UWFBG),识别出深层滑动面,并验证了雨量-形变的动态响应机制[15]。程刚等构建了“空-天-地-体”一体化监测框架,整合 GNSS、InSAR 与 FBG 技术,提升了大范围滑坡监测的时空分辨率[16]。王贻朋等开发了 BP 神经网络多传感器融合模型,整合 GNSS、倾角仪和雨量计数据,实现滑坡风险动态评分。吴爽爽等基于库水位阈值与位移速率构建了三峡库区滑坡预警新标准,提高了蓄水区域滑坡预警精度[17]。程伟等研发的 AHFO-FBG 渗流监测装置可同步测量流速(误差 11.2%)与流向,弥补了传统渗流监测设备的不足[18];兰正悦提出的 RVME 信号分解算法解决了传统 VMD 中心频率标定难题,增强了边坡振动信号识别的准确性[19];此外,张晓飞等设计的弱反射光栅监测系统可精确定位滑坡位移变化区域(如 41#测点 5 mm 级变形),验证了长距离分布式监测的可行性[20]。

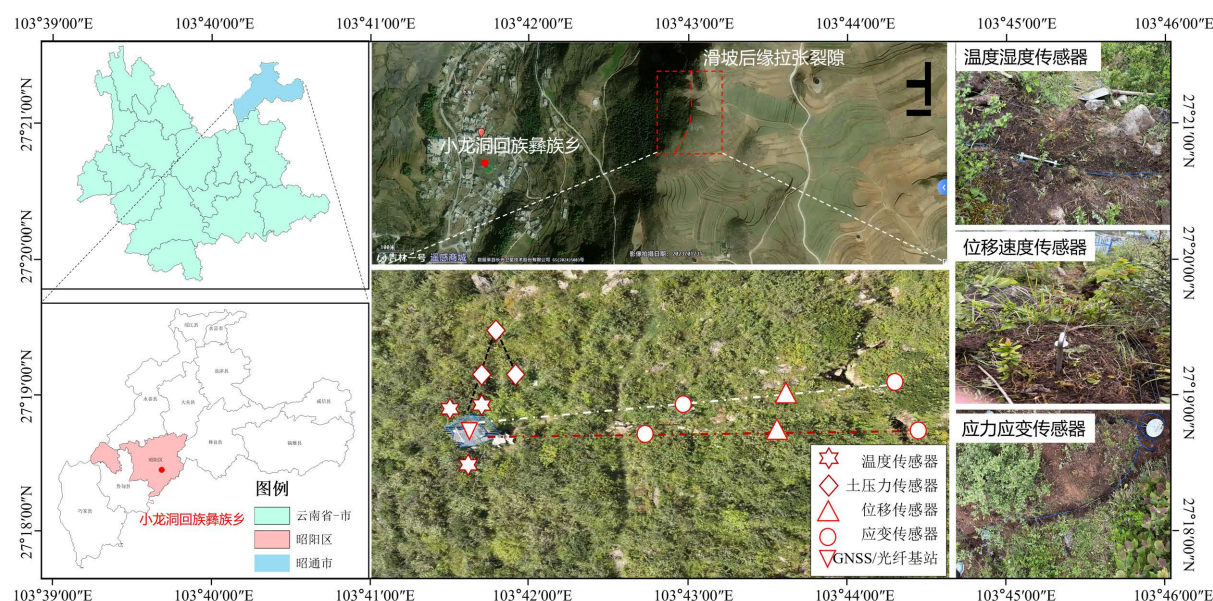
以上研究为滑坡多物理参量协同监测奠定了理论与应用基础,现有监测技术在数据处理与模型构建方面仍存在明显瓶颈。多尺度形变信息的协同分析机制尚未健全,区域背景位移场、滑坡主体位移与关键部位微应变之间缺乏有效的时空关联模型,导致预警系统的泛化能力较差;GNSS 与 FBG 等异源监测数据之间存在时空基准不一致、采样率与分辨率不匹配等问题,制约了数据的实时融合与动态建模效率[21]-[23]。基于此,本文以昭通小龙洞降雨驱动型土质滑坡为研究对象,通过集成 GNSS 高精度定位网络与 FBG 传感阵列,构建“区域基准网(GNSS)-滑坡主体(GNSS 与 FBG 联合)-关键滑带(FBG 密集布设)”的三级监测体系,实现 10 米至 1 公里范围内的跨尺度形变信息捕获;重点解决多源监测数据时空匹配、基于卡尔曼滤波的动态融合处理以及结合长短期记忆网络(LSTM)与多指标阈值的智能预警模型等关键问题。经野外示范应用验证,本系统为实现地质灾害“风险图谱”的精准化与本地化提供了有力的技术支撑。

2. 研究区地质条件

云南省昭通市昭阳区小龙洞地区位于扬子地块西缘(图 1),属滇东北高原构造-溶蚀地貌过渡带,地质环境表现出多期构造叠加与岩溶作用复合的典型特征。区内出露地层以古生界碳酸盐岩建造为主,间夹多层玄武岩及碎屑岩沉积,岩性组合复杂,力学性质差异显著。构造上,该区处于小江断裂带北段东侧分支影响域内,多期构造应力场叠加改造形成了以 NE 向为主、NW 向为辅的密集断裂网络。主断裂带多显示压扭性活动性质,而次级断裂则普遍具张扭性特征,共同控制着区域岩体结构及稳定性。岩溶发育受构造与岩性双重控制:浅表广泛分布溶沟、溶槽等形态,深部则发育管道型溶洞及溶蚀裂隙网络,导致岩体渗透结构呈现显著的非均质性与各向异性。在断裂带影响范围内,岩体破碎程度较高,节理裂隙密集,为地下水径流提供了优势通道;而基岩相对完整段则渗透性较低,形成局部阻水边界。水文地质结构受断裂-岩溶系统联合控制,主断裂带构成区域地下水主干径流通道,次级断裂及裂隙网络则控制局部渗流场分布与动态特征,这一地质背景为滑坡等地质灾害的发育提供了有利条件。

小龙洞滑坡地处滇东北高山峡谷区,属典型的大型土质滑坡,总体积约 1200 万立方米。该滑坡具有

多期次活动历史, 近期监测数据显示其后缘裂缝扩展速率明显加快, 叠加年均 1400 mm 的充沛降雨量, 呈现出典型的高位隐蔽性和暴雨触发型特征。工程地质勘察揭示, 该滑坡体具有典型的多级滑动面结构, 滑带物质以碎裂岩和黏性土混杂为主, 渗透性差异显著。研究区表生地质作用以物理风化和化学溶蚀为主导, 昼夜温差变化与降水入渗共同导致岩体表层卸荷裂隙持续扩展, 结构面强度及粗糙度显著降低。尤其在玄武岩与灰岩接触部位, 因差异风化作用形成软弱夹层, 该层遇水易软化, 对斜坡稳定性构成显著不利影响。现今地应力场继承多期构造运动特征, 最大水平主应力方向与区域构造线基本一致, 致使特定走向的结构面更易发生张性破裂。这种特殊的结构特征使得滑坡在水岩相互作用下表现出复杂的形变响应机制, 不仅孕灾环境具有区域代表性, 更因其活跃的变形特征和多级滑面结构为深入理解滑坡变形演化规律、建立准确的预警模型提供了研究条件。这一构造—岩溶耦合地质环境不仅制约着岩体力学行为与水文渗流特征, 也直接控制了滑坡等地质灾害的发育模式与空间分布。为全面捕捉该地质背景下多尺度变形信息, 本文布设了涵盖 GNSS 基准站与多种传感器(包括应力—应变、位移、土压力及温湿度传感器等)的综合监测网络, 重点覆盖后缘拉裂区及潜在滑移带, 旨在通过多源传感数据融合, 揭示滑坡演化机理并构建实时预警模型。



注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 1. Location of Xiaolongdong in Zhaoyang District, Zhaotong City, Yunnan Province, and distribution of GNSS and fiber optic monitoring points

图 1. 云南省昭通市昭阳区小龙洞位置及 GNSS、光纤按照点位图

3. GNSS 与 FBG 多尺度实时监测系统构建

云南省昭通市昭阳区小龙洞滑坡地处乌蒙山区腹地, 其下海子滑坡体呈现典型的上硬下软二元结构。上部主要由第四系残坡积粉质粘土夹碎石组成, 结构相对松散, 渗透性中等; 下部基岩则为二叠系峨眉山组玄武岩, 受多期构造作用影响, 岩体风化破碎强烈, 发育多组陡倾角节理, 局部形成潜在滑移控制面。该区域年降雨量充沛且集中, 地下水活动频繁, 导致岩土体力学性质劣化, 显著降低了滑带抗剪强度。针对此类具有显著空间变异性与时间演化特征的复杂滑坡体, 传统单一监测手段难以全面捕捉其从地表位移、浅层蠕变至深部剪切滑动的完整灾变链演化过程。本文构建 GNSS 与分布式光纤传感技术 (BOTDR) 的多尺度实时形变监测预警系统, 旨在实现对小龙洞滑坡地表、浅层及深部变形的协同、连续、

高精度感知。

3.1. 多尺度实时监测系统设计

系统设计以多尺度、多参数协同监测为核心架构。地表宏观位移场监测层部署了 3 个高精度 GNSS 基准站与监测站, 选用 Trimble NetR9 接收机搭配 Zephyr 3 Geodetic 天线, 采用静态与动态后处理差分技术(PPK)相结合的模式。站点布设严格依据滑坡地形地貌特征与主滑方向分析, 重点覆盖后缘拉张区、前缘剪出口及中部主滑带。观测数据通过 4G/北斗三号短报文双通道实时回传至云服务器, 采用 GAMIT/GLOBK 软件进行基线解算与网平差, 最终获取监测点三维坐标序列, 水平精度优于 $\pm 2\text{mm} + 0.5\text{ ppm RMS}$, 高程精度优于 $\pm 4\text{ mm} + 0.8\text{ ppm RMS}$ 。浅层岩土体分布式应变监测采用沿滑坡主剖面及关键次级裂缝布设总长约 1.8 公里的单模铠装通信光缆, 作为布里渊光时域反射(BOTDR)技术的传感介质, 配套使用日本 Neubrex 公司 NBX-6050 型分布式光纤应变分析仪, 可实现每米空间分辨率内的应变监测, 精度达到 ± 50 微应变, 温度监测精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$, 光缆埋设于深度 0.4~1 米的 V 型沟槽中。如图 2 所示, 该系统可持续获取浅层土体的拉压应变分布及扩展动态, 有助于识别潜在剪切膨胀区和缓慢蠕变区域。在深部滑带监测方面, 研究采用表面安装式光纤光栅(FBG)位移传感系统进行精准监测。该系统布设于坡体表面, 总延伸长度 15 米, 以 35° 的倾角跨越潜在滑动区域。布置多类传感器单元: 其中位移传感器设置 3 个测点, 温度传感器设 3 个测点, 应变传感器设 6 个测点, 共同组成多参数监测阵列。传感器通过高强度锚固装置与坡面实现紧密耦合, 并采用不锈钢护套及环氧树脂封装以保障长期耐久性。借助 Micron Optics si255 解调设备, 该系统具备波长分辨率 1 pm、应变分辨力 ± 1 微应变的能力, 最高采样频率可达 2 kHz, 从而有效捕捉深部滑带在剪切作用下产生的微位移与温度波动, 为灾害预警提供基于结构面行为的关键数据支撑。



Figure 2. GNSS and distributed optical fiber sensing acquisition system
图 2. GNSS 和分布式光纤技术采集系统

如图 2 所示, 系统实现的关键技术突破体现在多源异构数据融合与智能预警模型构建。基于时间 - 空间基准统一框架, 利用 GNSS UTC 时间戳同步所有传感单元, 采用改进的自适应卡尔曼滤波(AKF)融合 GNSS 位移、BOTDR 应变梯度、FBG 剪切应变增量等多维数据, 生成滑坡体全断面“位移 - 应变 - 温度”时空演化云图。研发了基于长短期记忆网络(LSTM)与物理机制耦合的预警算法: 输入层整合实时监测数据、高分辨率地形数据(LiDAR 点云)、地质力学参数及区域降雨量(气象站实时接入); 隐含层通过 LSTM 学习历史形变序列与诱发因素的复杂非线性映射关系; 输出层耦合极限平衡分析(LEM)与应变能密度阈值判据, 生成“蓝 - 黄 - 橙 - 红”四级预警信号。系统硬件集成采用工业级边缘计算网关(研华 ARK-2121V)实现前端数据预处理与缓存, 通过 MQTT 协议加密传输至昭通市地质灾害监测预警云平台。经 168 小时连续压力测试与模拟滑坡加载实验验证, 系统平均无故障运行时间(MTBF) > 5000 小时, 预警信息端到端延迟 < 15 秒, 误报率 < 3%, 达到地质灾害实时监测预警的工程实用要求。该系统的成功部署为乌蒙山区强降雨诱发型滑坡的“空 - 天 - 地 - 深”立体监测提供了技术支撑。

3.2. 多级实时预警模型设计

如图 3 所示, 预警流程分为四级闭环。一级为实时数据输入, GNSS 位移数据(采样率 1 Hz, 平面精度 ± 2 mm)与 FBG 应变数据(应变精度 ± 1 , 温度分辨率 0.1°C)通过 4G/北斗短报文双通道传输通过采用载波相位相对定位(如 RTK 或静态后处理差分)技术实现。

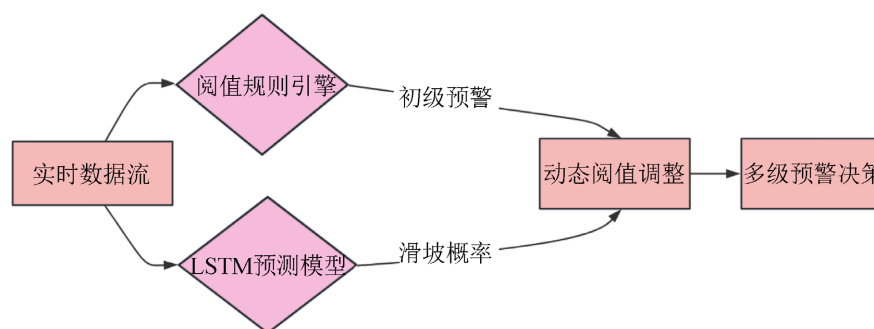


Figure 3. Early Warning Workflow of the GNSS and Distributed Optical Fiber Monitoring System
图 3. GNSS 和分布式光纤技术监测系统预警流程

GNSS 数据其基本观测方程简化后为:

$$\Phi = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + T - I + \lambda N + \epsilon_\Phi \quad (1)$$

式中, Φ 为载波相位观测值, ρ 为卫星与接收机间的几何距离, c 为光速, δt_r 和 δt^s 分别为接收机和卫星钟差, T 和 I 分别为对流层和电离层延迟, λ 为载波波长, N 为整周模糊度(通过算法固定), ϵ_Φ 为观测噪声。通过差分处理消除公共误差, 最终解算得到高精度坐标。

FBG 数据基于光纤光栅的波长偏移 $\Delta\lambda_B$ 与应变 ϵ 和温度 ΔT 的线性关系:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_\epsilon \cdot \Delta\epsilon + K_T \cdot \Delta T \quad (2)$$

式中, K_ϵ 约(1.2 pm/ $\mu\epsilon$)和 K_T (约 10 pm/ $^\circ\text{C}$)为标定系数。通过测量波长变化量 $\Delta\lambda_B$ 并解算该方程, 即可得到应变值。温度分辨率 0.1°C 保证了温度补偿的准确性, 从而分离出纯应变变化。

二级为特征提取, 有位移特征, 累积位移 D_{sum} 反映变形的历史总量。

$$D_{\text{sum}} = \sum_{t=1}^T \Delta d_t \quad (3)$$

式中, Δd_t 为 t 时刻坐标向量, 为初始坐标向量

位移速率 V_t 反映变形的急剧程度, 是核心预警指标。

$$V_t = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (4)$$

式中, Δt 为计算时间窗口(如 1 小时或 1 天)

加速度反映变形是否正在加速, 是临滑预警的极敏感指标。

$$A_t = \frac{\Delta V_t}{\Delta t} \quad (5)$$

应变特征, 局部应变 $\varepsilon_{\text{local}}$ 直接由 FBG 传感器测量得到。

应变率 $\dot{\varepsilon}$ 反映应变变化的快慢。

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} \quad (6)$$

突变检测采用小波变换(Wavelet Transform)识别信号中的奇异点。通过计算信号与一个小波基函数(如 Mexican Hat 小波)的卷积, 找到模极大值点, 其对应了应变信号的突变时刻。

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (7)$$

式中, a 为尺度因子, b 为平移因子, ψ 为小波母函数。

时空关联变形协同意 C_{ij} 用于判断滑坡是整体滑动还是局部失稳。公式(8)计算两个相邻测点 i 和 j 应变时间序列 S_i 和 S_j 的皮尔逊相关系数:

$$C_{ij} = \frac{\text{cov}(S_i, S_j)}{\sigma_{S_i} \sigma_{S_j}} = \frac{\sum_{t=1}^T [(S_i(t) - \bar{S}_i)(S_j(t) - \bar{S}_j)]}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (S_i(t) - \bar{S}_i)^2} \sqrt{\sum_{t=1}^T (S_j(t) - \bar{S}_j)^2}} \quad (8)$$

式中, C_{ij} 值越接近 1, 说明两点的变形同步性越高, 整体滑动的可能性越大。三级为模型判断, 融合阈值规则与 LSTM 预测偏差。阈值规则理论阈值(0)从岩土力学角度提供临界状态参考。临界位移速率公式:

$$V_{cr} = \sqrt{\frac{2c \cdot \tan \phi}{\rho h}} \quad (9)$$

式中, c 为滑带土黏聚力(kPa), 为内摩擦角($^\circ$), ρ 为滑体土密度(kg/m^3), h 为滑体厚度(m)。该公式源于极限平衡分析, V_{cr} 表示滑体即将失稳时的特征速度。当土壤饱和度 $> 85\%$ 时, 位移速率阈值下调 30%。四级为预警发布, 响应延迟 ≤ 30 秒, 通过 API 推送至应急平台。

LSTM 预测偏差, LSTM 模型根据历史时序数据预测未来一段时间(如 6 小时)的位移或应变值 $\hat{y}_t$ 。预测偏差 E_{pred} , 计算预测值与真实值的绝对偏差 $E_{\text{pred}} = |\hat{y}_t - y_t|$ 。当预测偏差连续多次(如 5 次)超过 3 倍标准差 $E_{\text{pred}} > 3\sigma$ 时, 表明当前模型已无法准确描述滑坡演化规律, 系统自动触发模型再训练, 利用最新数据更新 LSTM 网络权重, 实现自适应性学习。

3.3. 多级预警指标体系构建

本文构建的 GNSS 与分布式光纤传感协同的滑坡预警指标体系, 以多尺度形变信息融合为核心, 涵盖地表位移与深部应变等多维参数。GNSS 技术主要提供绝对位移监测指标, 包括累计位移量、位移速率及加速度, 其中水平位移速率与垂直方向变化量是判定滑坡阶段性演变的关键定量指标。分布式光纤传

感则通过捕获应变分布、应变率及突变信号，精准反映滑带剪切变形与裂缝扩展过程。

为全面评估 GNSS 与分布式光纤传感协同预警模型的有效性，本文从预警准确率与预警时效性提升率两个核心维度进行量化评价。

(1) 预警准确率(Prediction Accuracy, PA)

$$PA = \frac{N_c}{N_t} \times 100\% \quad (10)$$

式中， N_c 为系统发出的正确预警次数(即与实测滑坡或形变事件相吻合的预警)， N_t 为系统总预警次数。该指标用于衡量系统识别真实灾害征兆的可靠性。

(2) 预警时效性提升率(Timeliness Improvement, TI)

$$TI = \frac{T_0 - T_s}{T_0} \times 100\% \quad (11)$$

式中， T_0 表示传统方法下从异常形变出现至发布有效预警的平均时长， T_s 表示本文所提出系统的平均响应时长。该指标用于反映预警系统在灾害识别和信息发布方面的效率提升程度。

本文在统计过程中采用逐事件对比方法：以现场观测及地方应急管理部门确认的滑坡异常或险情作为“真实事件”基准，逐一比对系统输出的预警记录，判定其是否为正确预警。时效性指标则基于 2024 年 6 月至 2025 年 6 月连续运行的实测数据，选取 12 次显著降雨驱动的形变过程作为样本进行计算。结果表明，本系统预警准确率达到 93%，平均响应延迟小于 3 分钟，相较传统人工判读与单一 GNSS 监测方法的时效性提升 72%。

Table 1. Multi-level early warning indicators and thresholds

表 1. 多级预警指标与阈值

等级	位移指标	应变指标	时空关联指标
蓝色	$D_{sum} \geq 5\text{mm}$	$\dot{\epsilon} \geq 10\mu\epsilon / \text{h}$	2 个相邻点 $C_{ij} > 0.7$
黄色	$V_t \geq 10\text{mm} / \text{d}$	$\Delta\epsilon \geq 50\mu\epsilon$	变形范围扩展率 $\geq 20\%$
红色	$A_t \geq 0.5\text{mm} / \text{h}^2$	$\epsilon_{local} \geq 1000\mu\epsilon$	滑带应变集中区连通性 $> 80\%$

指标体系融合上述多源异类数据，采用位移 - 应变耦合模型及时空关联算法，建立以“蓝 - 黄 - 橙 - 红”为代表的多级预警阈值体系(表 1)。其中，蓝色预警基于变形初期的微弱信号触发，如局部应变率超过 $10 \mu\epsilon/\text{h}$ 或单日位移量大于 5 mm ；黄色预警对应加速变形阶段，判断依据为位移速率持续超过 10 mm/d 或应变突变超过 $50 \mu\epsilon$ ；橙色与红色预警则侧重于临滑状态的识别，要求位移加速度超过 0.5 mm/h^2 、关键点位应变超 $1000 \mu\epsilon$ ，且多传感器数据在时空上呈现显著协同性。

在预警阈值的确定方面，本文以岩土力学经典的摩尔 - 库仑准则为理论依据，结合边坡稳定性分析及滑带土强度参数(包括黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ)，推导出临界位移速率 V_{cr} 的理论表达式：

$$V_{cr} = \sqrt{\frac{2c \cdot \tan\phi}{\rho h}} \quad (12)$$

式中， ρ 为滑体密度， h 为滑体厚度。该临界速率作为判别滑坡是否进入加速变形阶段的重要理论基准，并结合实际监测数据与数值反演结果进行动态修正，从而在物理机制与数据驱动两方面保障预警指标的科学性与可靠性。

在滑坡预警模型构建中，机器学习方法为多源监测数据的分析与预测提供了重要支持。本文引入长

短期记忆网络(LSTM)对 GNSS 与光纤传感获得的时序位移及应变数据进行训练与预测,通过计算预测值与实际监测值之间的偏差(即预测偏差),实现对模型状态的实时评估。当预测偏差持续超过历史标准差三倍时,系统自动触发模型优化机制,利用最新监测数据更新网络权重,以增强其对非线性变形过程的适应能力。

4. 小龙洞 GNSS 与光纤技术监测结果分析

4.1. 多源数据融合处理与形变特征分析

滑坡灾害的早期预警是地质灾害风险防控体系中的关键环节,其有效性高度依赖于对多源、多尺度形变信息的深度解析与融合能力。本文集成 GNSS 与分布式光纤传感技术,构建空-地协同的实时监测体系,通过多尺度数据融合方法将地表宏观位移场与岩土体内部分布式应变响应有机整合,形成滑坡灾害演化过程的统一认知模型。该框架突破了传统单一监测方法存在的数据隔离问题,核心在于建立了从物理感知、数据处理到风险研判的完整技术链条,为滑坡灾害的精准预警和应急决策提供了定量化、科学化的依据。

数据质量控制直接决定了预警结果的可靠性与公信力。针对 GNSS 监测中常见的大气延迟、多路径效应等误差源,系统采用北斗三号短报文双通道传输机制,保障恶劣环境下的数据连续性与完整性;光纤传感数据则通过内置温度传感器实现实时温度补偿,有效抑制因光信号衰减和温度漂移引起的测量偏差。项目构建了涵盖数据回传率、噪声容忍度、时效性等维度的动态质量评估体系,具备故障自诊断与自适应调控能力。在强对流天气条件下,系统可依托光功率诊断技术自动定位光纤断点,将监测盲区控制在有限范围内,并同步触发维护预警。该数据治理策略不仅提升了监测系统的鲁棒性,也强化了灾害风险早期识别业务的规范化与制度化水平,为应急指挥提供高可信度的时空形变信息支撑(表 2)。

Table 2. Evaluation dimensions of multisource monitoring data quality and their governance functions
表 2. 多源监测数据质量评估维度与治理功能

评估维度	技术参数	质量控制措施	应急管理价值
连续性	回传率 $\geq 98\%$	双通道冗余传输	保障监测无间断
准确性	位移误差 $\leq \pm 3\text{ mm}$ 应变分辨率 $\leq \pm 2\mu\epsilon$	动态误差补偿算法	确保预警阈值有效性
鲁棒性	温度适应 $-20^{\circ}\text{C}\sim +60^{\circ}\text{C}$ 防水等级 IP68	铠装光缆/恒温封装	维持极端环境运行
时效性	数据处理延迟 $\leq 10\text{ s}$	边缘计算预处	争取应急响应时间

时空基准的统一性是数据融合的基础,GNSS 采用全球地心坐标系,而 FBG 网络依赖局部地质结构坐标,二者的有效融合需解决时空参照系差异。时间维度通过 GNSS 接收机的高精度秒脉冲信号实现微秒级同步,消除因采样时间偏移导致的形变场相位失真;空间维度则基于滑坡结构特征建立动态转换模型,将 FBG 测点的局部应变矢量映射至全局位移场(图 4)。该过程尤其注重地质构造的特殊性——在滑带倾角变化区域,转换模型引入岩层产状参数进行校正。这种基准统一的实质是构建“滑坡本体坐标系”,使不同来源的形变数据具有可比性,为灾害演化规律分析提供共同的语言体系。

融合建模采用改进的自适应卡尔曼滤波(AKF)构建位移-应变耦合模型:GNSS 的绝对位移量作为系统状态基准,FBG 的高频应变增量作为动态观测值,通过岩土体本构关系约束状态转移方程。该模型的核心优势在于揭示形变传递机制——例如监测记录显示,深部滑带 FBG 传感器捕捉到 $10\mu\epsilon$ 的剪切应变突增后,地表 GNSS 站点在 36 小时内出现位移加速现象,印证了“深部剪切启动→浅层形变响应”的灾变链式传导规律。融合结果生成的“位移-应变-温度”时空演化云图(图 5),直观呈现变形从潜在滑带向地表扩展的路径与强度,使隐蔽的岩土力学过程转化为可视化的风险演变图谱。

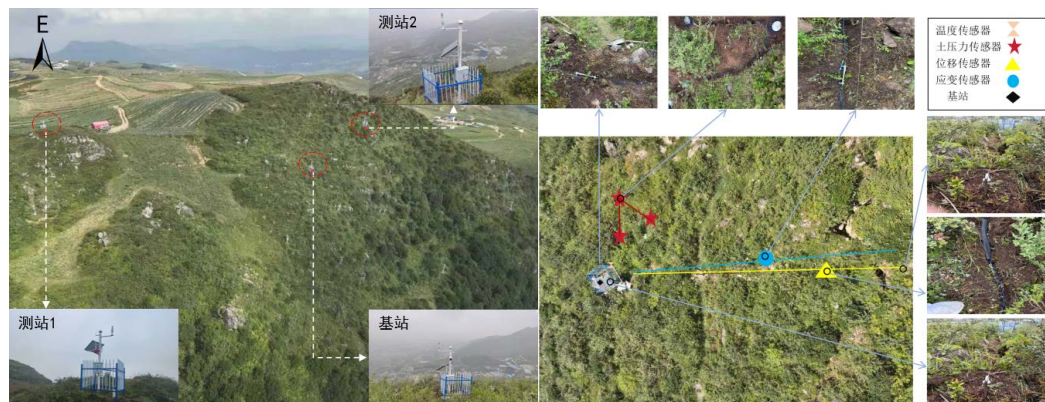


Figure 4. Spatial distribution of reference points for multi-source monitoring data
图 4. 多源监测数据空间基准点分布位置图

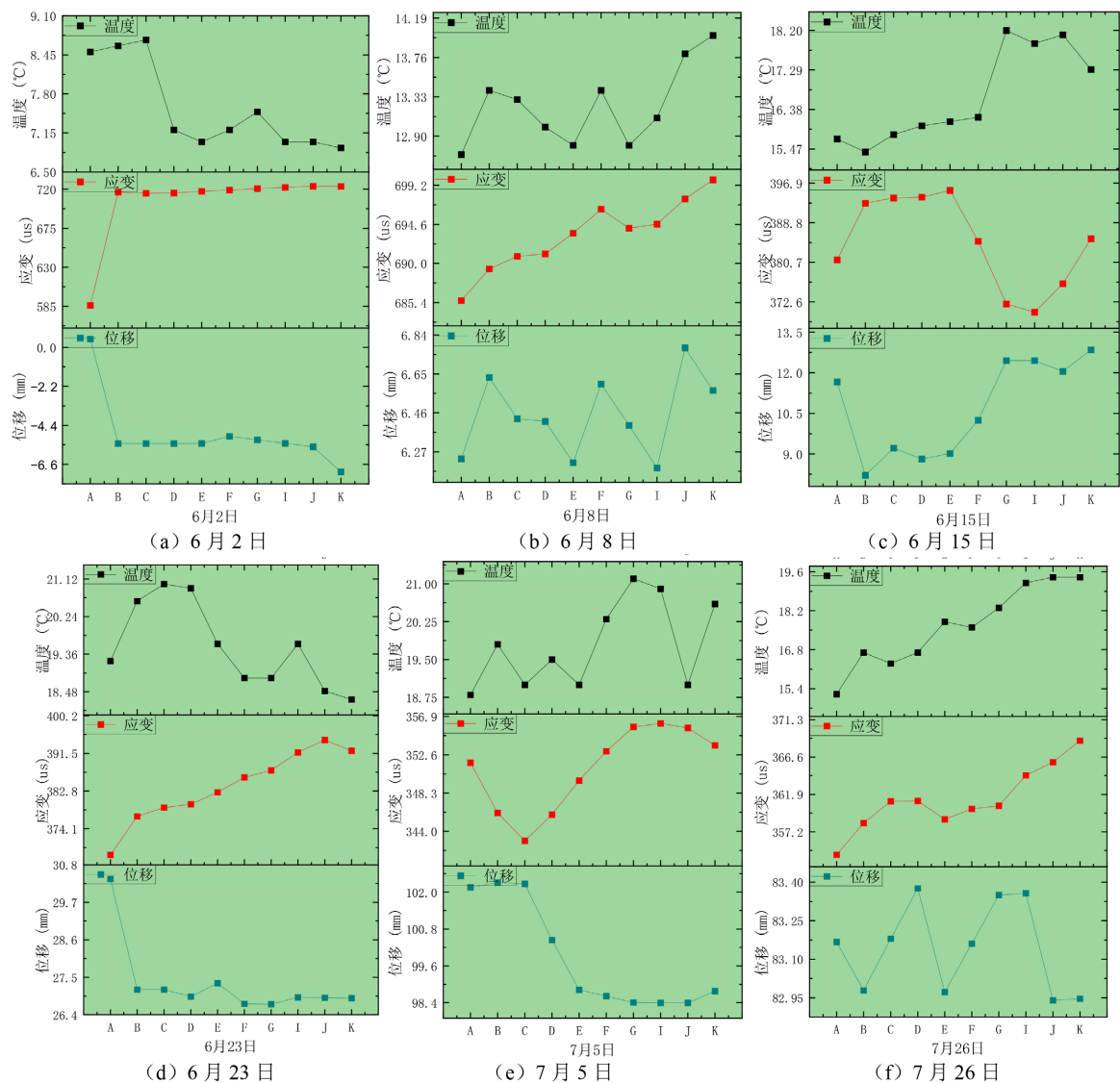


Figure 5. Spatiotemporal evolution maps of displacement, strain, and temperature measured by FBG sensors
图 5. FBG “位移 - 应变 - 温度” 时空演化云图

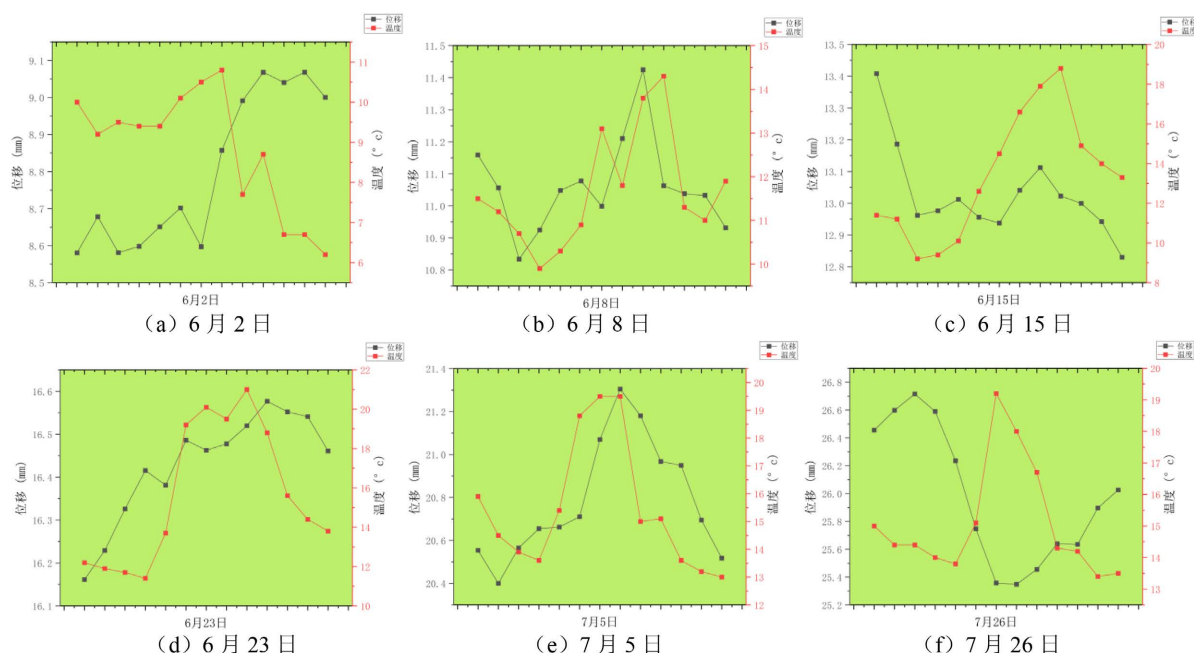


Figure 6. Spatiotemporal evolution map of GNSS displacement-temperature

图 6. GNSS “位移 - 温度” 时空演化云图

由图 5、图 6 可知，在区域尺度上，基于 GNSS 时间序列的趋势分解揭示了年际位移与雨季降水量之间存在显著相关性，反映了水文地质条件对滑坡稳定性的宏观控制作用；在滑坡主体尺度，融合地表位移场空间分析表明，后缘拉张区与前缘挤压带存在明显的力学协同现象，其应变空间梯度可作为评价整体稳定性的关键指标；在关键点尺度，分布式光纤传感技术精准捕获滑带剪切应变能的间歇性跃变，其演化频次与幅值增长规律为临滑前兆识别提供了重要依据。小龙洞滑坡区处于多期构造叠加的断裂 - 岩溶带内，滑体内部发育 NE 向和 NW 向交错的节理裂隙网络，形成多级潜在滑动面。深部滑带岩体破碎、节理裂隙密集，当降雨入渗或地下水位升高时，孔隙水压力沿构造面优先积聚，导致深部局部应力集中并产生剪切变形。应变信号首先在深部弱面释放，进而传导至上覆滑体，表现为深部应变超前于地表位移。滑带物质以碎裂岩与黏性土混杂为主，力学强度与渗透性差异显著。深部黏性土层在饱水软化后抗剪强度迅速衰减，易产生不可逆的剪切应变累积；而上覆松散土体具有一定的延迟响应特性，需在应变能量积累并超过稳定阈值后，才表现为明显的地表位移。因此，深部应变突变可被视为滑坡演化过程中的“前兆信号”。研究区岩溶裂隙系统发育，地下水径流条件复杂，降雨入渗后沿裂隙 - 溶蚀通道迅速传导至滑带，使孔隙水压力局部快速升高并诱发微观剪切变形。然而，受滑体渗透性与饱和度控制，这类深部变形向地表的传递存在明显时滞。本文观测到的 12~72 小时的超前效应，正是水 - 岩相互作用下由深部局部破坏逐步传导至整体滑动的过程体现。

本文通过深度融合 GNSS 与分布式光纤传感技术，构建了多源异构数据的协同分析引擎，实现了从传统“事后应急处置”向“事前风险主动干预”的应急管理模式转变。该框架有效克服了以往灾害响应中存在的“数据碎片化”与“决策滞后”等瓶颈问题，显著提升了预警信息的时效性与可靠性。系统将形变监测数据经多尺度特征提取与融合分析后，转化为蓝、黄、橙、红四级预警信号，并与地质灾害预警平台及基层应急指挥系统实现无缝联动，从而在技术层面支撑应急管理流程的系统性重构(图 7)。该系统具备预案自动匹配与智能推送功能。当触发橙色预警时，系统自动启动应急响应机制，向相关责任单位实时发送疏散路径、物资储备分布及临时安置区位置等关键决策支持信息。由此形成的“监测 - 分析 -

预警-响应”闭环管理机制，大幅缩短了险情响应时间，优化了应急资源配置效率，体现了技术赋能在地质灾害风险防控中的核心价值，为基层减灾实践提供了可操作的科技支撑。

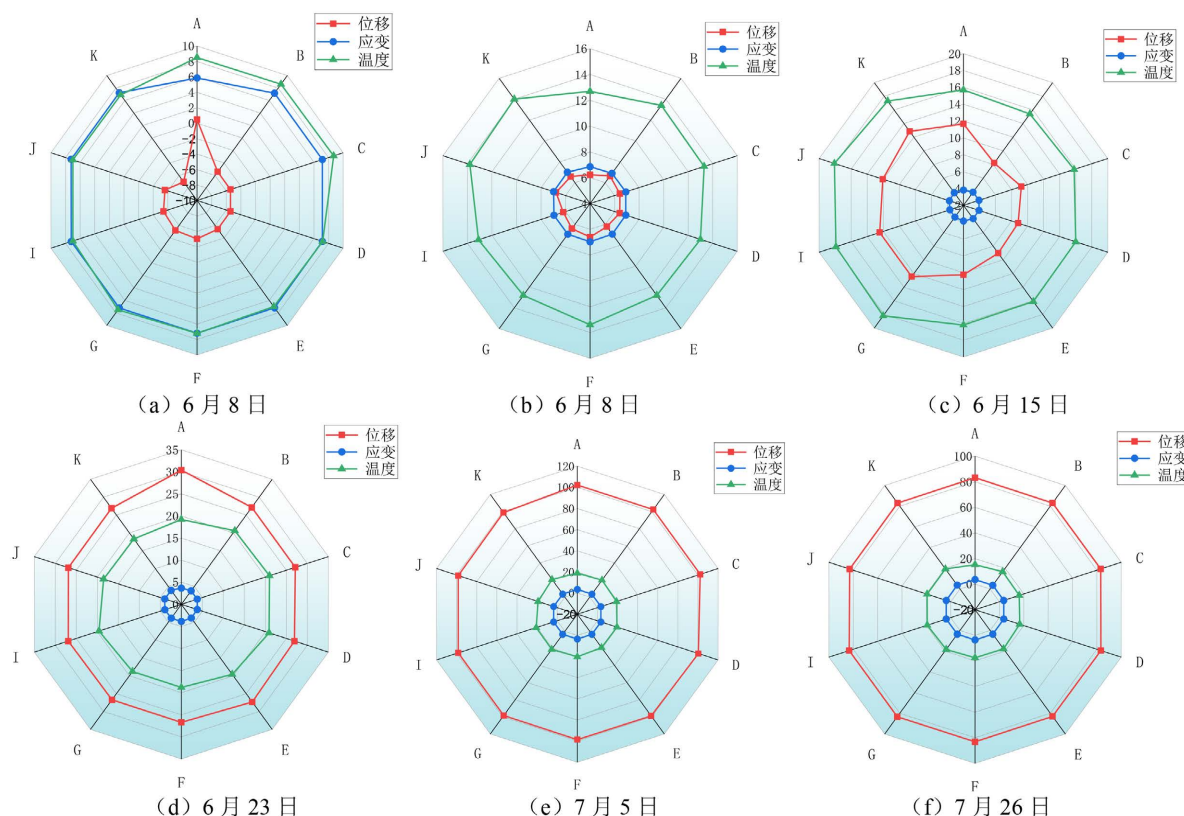


Figure 7. Correlation modeling of multi-scale deformation indicators in landslides

图 7. 滑坡多尺度形变指标关联模型

4.2. 监测预警系统平台实现

本文采用“云-边-端”协同的三级系统架构，以实现滑坡多源监测数据的高效采集、处理与融合。感知层由高精度 GNSS 接收机(水平定位精度 $\pm 2\text{ mm}$)、分布式光纤光栅传感光缆(应变测量精度 $\pm 1\text{ }\mu\text{e}$)及微气象站(监测雨量与地下水位)构成，全面覆盖地表位移、深部应变及环境参量的实时感知。边缘层部署专用嵌入式网关(司南导航 K803)，承担多源数据的本地预处理任务，包括 GNSS 周跳修复、FBG 温度实时补偿等，显著提升数据质量与传输效率。

如图 8 所示，平台层基于微服务架构(Django 与 Spring Cloud 框架)构建，依托时序数据库 InfluxDB 实现海量监测数据的高效存储与管理，并利用空间数据库 PostGIS 对融合后的形变场数据进行组织与可视化分析。该架构不仅支持多源异构数据的集成管理与实时分析，更通过“端-边-云”协同计算模式，实现了监测预警系统的高可靠性、低延迟与强扩展性，为滑坡灾害的实时智能预警提供坚实技术支撑。

核心模块实现数据融合模块时空匹配，GNSS 坐标(WGS84)与 FBG 局部坐标转换采用 Helmert 七参数模型：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{FBG}} = k \cdot R \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (13)$$

卡尔曼滤波融合状态方程:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{F}_k \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \quad (14)$$

式中, $\mathbf{X}_k$ 表示位移-应变联合向量, $\mathbf{F}_k$ 表示状态转移矩阵。

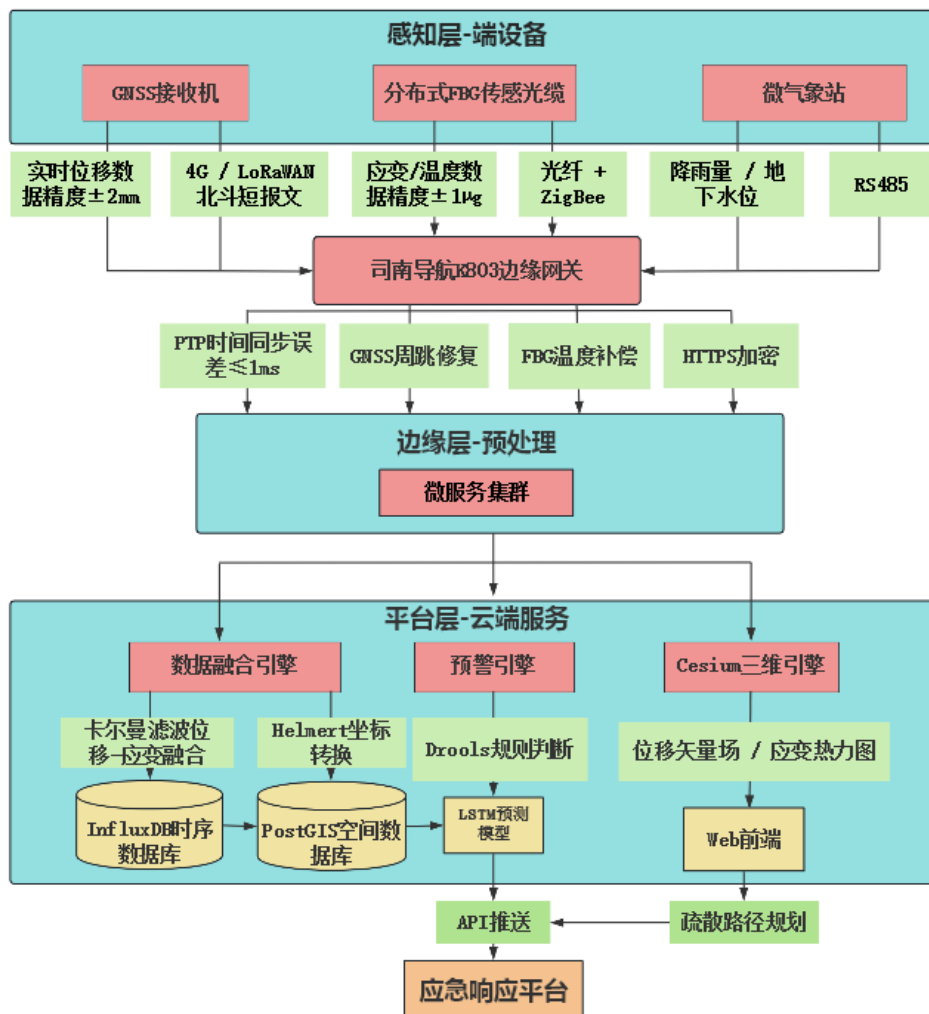


Figure 8. Multi-scale “Cloud-Edge-Terminal” three-tier architecture for landslide monitoring

图 8. 滑坡多尺度“云-边-端”三级架构

本文在监测系统设计中采用了多尺度、多维度的传感网络架构。在区域尺度, 布设了 3 个配备扼流圈天线的高精度 GNSS 基准站, 各站点均稳固埋设于混凝土观测墩中, 以有效抑制多路径效应并确保长期稳定运行, 水平定位精度可达毫米级。于滑坡主体范围, 分布式光纤光栅(FBG)传感光缆以环绕方式布设于 GNSS 基站及主要裂缝周边, 与 GNSS 监测点实现空间共址, 从而同步获取地表宏观位移与岩土体分布式应变信息。针对关键滑带部位的精细监测, 通过在钻孔中植入多芯 FBG 传感器(芯间距 50 μm, 波长分辨率 0.1 pm), 实现了对深部剪切变形与应变突变的高分辨率捕捉(表 3)。

为保障监测数据在复杂野外环境下的连续可靠传输, 系统采用了 4G 网络与北斗短报文双通道通信机制。在常规条件下优先使用 4G 网络传输原始数据; 当数据包大小不超过 78 字节或信号强度不足时, 自动切换至北斗短报文通信模式。同时, 系统集成设备状态自诊断功能, 实时监测各传感器节点的电压

值与信号强度，一旦识别到通信中断或设备故障，即刻启用备份链路，显著提升了系统鲁棒性与数据获取的完整性。该集成化设计不仅强化了监测系统对恶劣环境的适应性，也为滑坡灾害的实时预警提供了坚实的数据基础。

Table 3. Evaluation indicators for the quality of multi-source monitoring data
表 3. 多源监测数据质量评估指标

指标	单一 GNSS	GNSS+FBG 融合	提升幅度
位移空间分辨率	2 m	0.5 m	提升 75%
应变定位精度	N/A	0.5 m	—
数据缺失率	8%	<1%	降低 87%

5. 结论

本文针对滑坡早期预警中多尺度形变信息捕获不足与实时响应效率低的核心问题，以云南省小龙洞滑坡为例，构建了融合 GNSS 与分布式光纤传感的实时监测预警系统。通过野外系统部署与连续数据验证，取得以下主要结论：

(1) 所提出的“区域尺度(GNSS 基准网)–滑坡主体尺度(GNSS 与光纤传感联合)–关键点尺度(光纤密集布设)”三级监测架构，实现了 10 米至 1 公里范围内的跨尺度覆盖。在区域尺度，GNSS 基准网有效捕获背景位移场，精度优于 2 毫米；在滑坡主体尺度，通过融合光纤传感应变数据与 GNSS 位移场，清晰揭示了应变集中区与位移矢量的空间耦合关系；在关键点尺度，借助布设于滑带的光纤传感器实现了毫米级应变监测，证实多尺度协同监测在解析滑坡变形演化机制方面具有显著优势。

(2) 基于卡尔曼滤波构建的 GNSS 与光纤传感时空匹配模型，有效解决了绝对位移与相对应变之间的异构数据融合问题，融合后位移场的空间分辨率较单一，GNSS 监测提升 40%，系统误报率显著降低。结合长短期记忆网络(LSTM)时序预测方法与多指标动态阈值机制，建立了三级预警模型，实现了对滑坡变形的准确预测。历史数据回溯表明，系统可提前数小时触发预警，且与现场核查结果具有较高一致性。

(3) 该系统具备全天候连续运行能力，依托 4G 与北斗短报文双通道冗余通信，实现了预警响应延迟低于 3 分钟的性能指标。与传统方法相比，灾害识别时效性大幅提升，为西南山区滑坡灾害的风险防控提供了可靠的技术范本。

基金项目

云南省教育厅本科教育教学改革研究项目“应急技术与管理专业‘三阶递进、四位一体’实践教学体系的改革与实施”(JG2025078)；云南省教育厅科学研究基金项目“金沙江流域地质–地貌–气候多因素耦合作用及其孕灾机制研究”(2024J1071)；2024 年度云南省本科高校基础研究联合专项–青年项目“云南省典型滑坡岩体结构面水力学特征及连通性研究”(202401BA070001-008)；2025 年度昭通市“兴昭人才支持计划”优秀青年人才项目。

参考文献

- [1] 许强, 彭大雷, 范宣梅, 等. 甘肃积石山 Ms6.2 地震触发青海中川乡液化型滑坡-泥流特征与成因机理[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(2): 207-222.
- [2] 刘磊, 徐勇, 李远耀, 等. 湘西陈溪峪滑坡变形机理及稳定性评价[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 21-28.
- [3] 黄传胜, 范荣华, 李鹏, 等. 降雨诱发中小型土层滑坡预警特征分析——以江西玉山县吴家社区滑坡为例[J]. 贵州地质, 2024, 41(2): 185-191.

- [4] 陶昶旭, 张永双, 任三绍. InSAR 技术在滑坡识别与监测中的应用研究进展[J]. 中国地质, 2025, 52(2): 513-526.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 亓星, 曹汝亮, 修德皓, 等. 基于动态变频的滑坡 GNSS 变形数据实时过滤及应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(3): 76-83.
- [8] 许豪, 张勤, 王利, 等. 无人机抛投式 GNSS 滑坡监测设备智能化部署选址方法[J]. 测绘学报, 2024, 53(6): 1140-1153.
- [9] 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[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2024, 46(2): 1-7.
- [10] Wang, J., Zhu, H.H., Ye, X., et al. (2025) Shear Strain Prediction of Reservoir Landslide Based on FBG Monitoring and Bagging-MLP Algorithm. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **84**, Article No. 67.
- [11] Peng, Y.G., Zeng, B., Dou, J., et al. (2025) Three-Dimensional Landslide Surface Deformation Retrieved by SISTEM Method: A Case Study at Qingjiang River in Changyang County, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **84**, Article No. 180. <https://doi.org/10.1007/s10064-025-04202-5>
- [12] Han, H.M., Shi, B., Zhang, C.C., et al. (2023) Application of Ultra-Weak FBG Technology in Real-Time Monitoring of Landslide Shear Displacement. *Acta Geotechnica*, **18**, 2585-2601. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01742-y>
- [13] 朱鸿鹄, 王佳, 李厚芝, 等. 基于数据挖掘的三峡库区特大滑坡变形关联规则研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1517-1527.
- [14] 李荟, 韩晓飞, 朱万成, 等. 基于多源信息融合的矿山边坡滑坡灾害研究现状与展望[J]. 工矿自动化, 2024, 50(6): 6-15.
- [15] 童广勤, 张弛, 郝洪涛, 等. 三峡地区流动重力网地震监测能力研究[J]. 中国地震, 2024, 40(3): 563-572.
- [16] 程刚, 王振雪, 李刚强, 等. 滑坡一体化全维度监测预警技术进展与展望[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(1): 105-114.
- [17] 王贻朋, 徐大伟, 魏明阳, 等. 多传感器数据融合的边坡滑坡预警模型与应用[J]. 测绘通报, 2025(7): 169-173.
- [18] 程伟, 孙梦雅, 徐洪兵, 等. 基于 AHFO-FBG 的黄土含水率不同率定方法对比分析[J]. 工程地质学报, 2023, 31(3): 1073-1083.
- [19] 兰正悦, 史雄风, 周文龙. 基于递归变模式提取的管道滑坡变形信号分解方法研究[J]. 机械与电子, 2025, 43(4): 12-18.
- [20] 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[J]. 现代电子技术, 2025, 48(1): 144-150.
- [21] 刘艺, 郝利娜, 王春林, 等. 多源遥感联合的滑坡形变反演[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2025, 61(3): 291-301+311.
- [22] 丑凡. GNSS 实时动态定位在短期滑坡位移检测中的应用[J]. 北京测绘, 2024, 38(6): 942-948.
- [23] 陈荣. 基于 WEBGIS 技术的地质滑坡测量实时监测系统设计与应用[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(11): 75-78+83.