

基于无人机多模态数据的滑坡“形变 - 温度”协同演化模型构建

凡 净^{1,2*}, 王利春¹, 张 豪¹, 虎佳杰¹, 张正飞¹, 黄 宇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

收稿日期: 2025年8月29日; 录用日期: 2025年10月14日; 发布日期: 2025年10月24日

摘 要

滇东北小江断裂带复杂地质条件下的滑坡监测长期受制于传统手段空间分辨率有限及多参数协同分析不足等问题。以昭通小龙洞灰岩 - 粘土复合地层滑坡为研究对象, 本文集成大疆M3T无人机多模态传感系统, 开展高分辨率4K可见光影像(分辨率0.7 cm)与热红外影像(640 × 512, 灵敏度50 mK)的同步获取, 构建滑坡“形变 - 温度”协同演化模型。研究结果表明, 基于改进的SfM算法实现的形变监测精度达到厘米级(相对精度1/1000), 空间分辨率较GNSS技术提升约两个数量级; 坡肩区 $2.1^{\circ}\text{C} \pm 0.4^{\circ}\text{C}$ 的热异常与滑带渗流表现出显著相关性 $R^2 = 0.86$, 在引入热弹性系数校正 $\beta = 0.08 \text{ MPa/K}$ 后, 模型拟合精度提高23%。基于该模型构建的动态预警系统, 将突发型滑坡响应时间由9小时缩短至2.5小时。研究成果不仅为复杂地形区滑坡的多参量耦合监测提供了新思路, 也为边远地区地质灾害防治与应急管理提供方法技术和基础数据。

关键词

滑坡监测, 无人机遥感, 多模态融合, 形变 - 温度协同, 热弹性效应, 动态预警

Construction of “Deformation and Temperature” Co-Evolution Model for Landslides Based on UAV Multi-Modal Data

Jing Fan^{1,2*}, Lichun Wang¹, Hao Zhang¹, Jiajie Hu¹, Zhengfei Zhang¹, Yu Huang¹

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

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

Received: August 29, 2025; accepted: October 14, 2025; published: October 24, 2025

*通讯作者。

文章引用: 凡净, 王利春, 张豪, 虎佳杰, 张正飞, 黄宇. 基于无人机多模态数据的滑坡“形变-温度”协同演化模型构建[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(10): 1382-1395. DOI: 10.12677/ag.2025.1510128

Abstract

Landslide monitoring in the Xiaojiang Fault Zone of northeastern Yunnan has long been constrained by the limited spatial resolution of conventional techniques and the lack of multi-parameter synergistic analysis. Taking the Xiaolongdong landslide, developed in a limestone-clay composite stratum in Zhaotong, as a case study, this paper integrates the DJI M3T UAV multi-modal sensing system to simultaneously acquire high-resolution 4K visible images (0.7 cm spatial resolution) and thermal infrared images (640×512 , sensitivity 50 mK), thereby constructing a “deformation-temperature” co-evolution model of landslides. The results demonstrate that the improved Structure-from-Motion (SfM) algorithm achieves centimeter-level deformation monitoring accuracy (relative accuracy 1/1000), with a spatial resolution nearly two orders of magnitude higher than that of GNSS. A thermal anomaly of $2.1^\circ\text{C} \pm 0.4^\circ\text{C}$ in the slope crest zone exhibits a strong correlation with slip zone seepage ($R^2 = 0.86$). After introducing a thermoelastic correction coefficient ($\beta = 0.08 \text{ MPa/K}$), the model fitting accuracy improved by 23%. Furthermore, the dynamic early-warning system based on this model reduced the response time for sudden landslides from 9 hours to 2.5 hours. These findings provide a novel approach for multi-parameter coupled monitoring of landslides in complex terrains and offer methodological and data support for geological hazard prevention and emergency management in remote regions.

Keywords

Landslide Monitoring, UAV Remote Sensing, Multi-Modal Fusion, Deformation-Temperature Coupling, Thermoelastic Effect, Dynamic Early Warning

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

滇东北昭通市昭阳区位于小江断裂带，新构造运动强烈，斜坡失稳风险显著[1]-[3]。2023 年，小龙洞乡灰岩 - 粘土复合地层出现滑坡后缘拉张裂缝，对水海子村百姓生命财产安全造成严重威胁。传统监测手段局限于区域复杂的地形、地貌和地质环境，如 GNSS 监测在坡度大于 35° 的地形条件下难以捕捉浅层蠕变形变特征[4]，且地面传感器受采矿扰动和地形破碎影响，导致连续监测能力不足[5]。

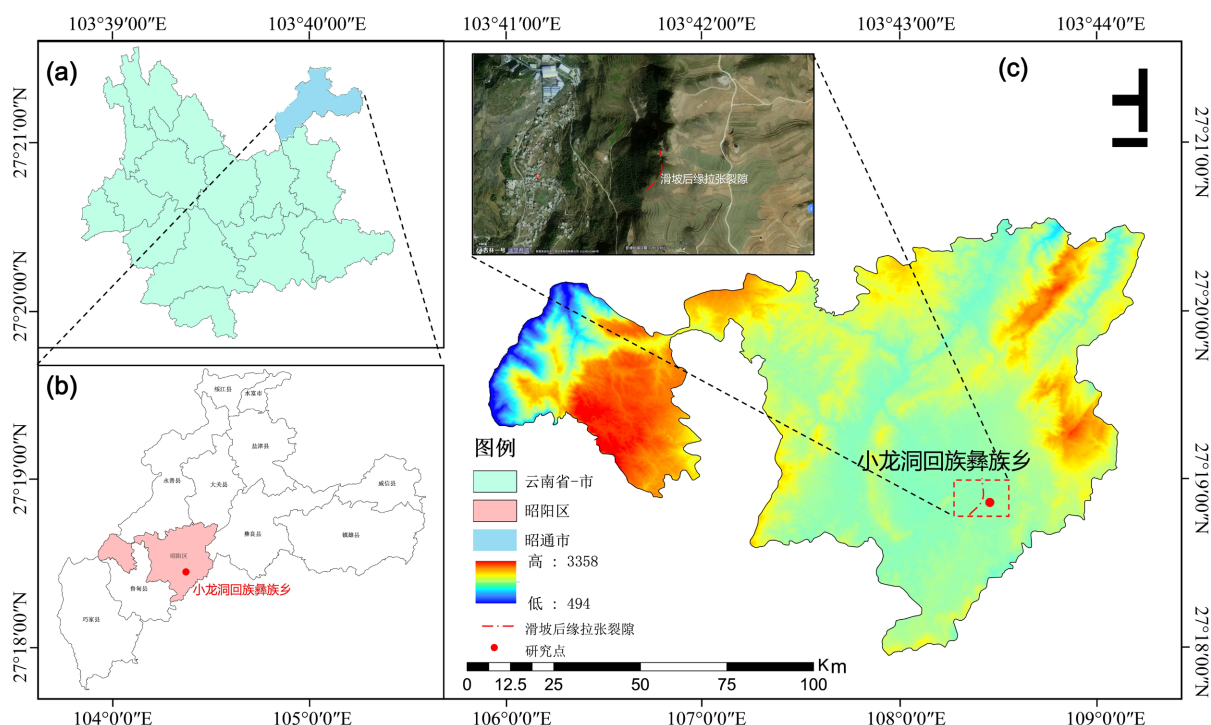
近年来，无人机多模态遥感技术在地质灾害监测中应用成熟且广泛，主要集中于高精度三维形变重建与多物理场耦合监测[6]-[8]。Sestras 等基于无人机摄影测量技术，实现了毫米至厘米级滑坡表面位移提取，为地表形变时空演化研究提供了新思路[9]。Tommasi 等将热红外遥感与可见光影像融合应用于阿尔卑斯山区岩质滑坡，揭示了裂隙渗流与热异常的对应关系[10]。Clark 等进一步结合多光谱数据分析植被应力与滑坡活动性，拓展了无人机多模态遥感在滑坡早期识别中的应用场景，强调形变、温度、水文与地球物理参数的联合监测[11]。国内程强等利用无人机摄影测量技术获取高分辨率数字表面模型(DSM)，实现了地表裂缝精细识别，为典型滑坡的微形变监测提供了新方法[12]。韩佳等在四川汶川震后滑坡区开展多模态无人机监测，发现热红外异常与地下水渗流及滑体活动性密切相关[13]。王新程等将可见光、热红外与多光谱影像联合应用于喀斯特斜坡，提出基于“形变 - 温度 - 水分”多参量的滑坡危险性评价方法，提升了复杂地质条件下的监测精度[14]。此外，国内学者逐渐重视无人机遥感在复杂地形区和极端气

候环境下的适应性, 尝试将热红外监测与 InSAR 技术、地面传感器观测等多源数据耦合, 构建滑坡灾害的综合监测与预警体系[15]-[18]。

研究表明, 无人机多模态遥感在滑坡监测中展现出巨大的应用潜力, 多模态信息的融合与物理过程机理的解释, 以及在复杂山地环境与应急监测等方面的应用是未来的研究趋势[19]-[22]。然而, 现有研究仍存在影像数据配准精度不足、多模态参数定量耦合机理不清、灾害快速响应机制尚未完善等问题[23]-[26]。因此, 探索适应复杂地形条件的无人机多模态遥感集成技术, 构建“形变-温度”协同演化模型, 对于提升滑坡灾害的监测精度与预警能力具有重要的科学意义和工程价值。本文采用大疆 M3T 无人机搭载 4K 可见光相机和 640×512 分辨率热红外传感器, 实现 0.7 cm 空间分辨率影像与 50 mK 热灵敏度数据的同步获取, 为小龙洞滑坡形变场与热异常场的高精度动态监测提供了新的技术路径。

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(a)), 处于滇东北高原构造-溶蚀地貌过渡带, 地质环境具有典型的多期构造叠加与岩溶复合特征。区内出露地层以古生界碳酸盐岩为主, 间夹多层玄武岩及碎屑岩沉积, 岩性组合复杂。构造上, 该区处于小江断裂带北段东侧分支的影响范围, 多期构造应力场叠加改造形成 NE 向为主、NW 向为辅的断裂网络体系(图 1(b))。主断裂带多表现为压扭性活动特征, 次级断裂则普遍具有张扭性活动迹象。岩溶作用受构造和岩性双重控制。浅表发育溶沟、溶槽等地表岩溶形态, 深部则形成管道型溶洞系统及溶蚀裂隙网络, 渗透结构表现出明显的非均质性与各向异性。断裂带附近岩体破碎严重, 节理裂隙密集, 易形成地下径流通道; 相对完整的基岩段则渗透性较低。水文地质格局受断裂-岩溶系统共同控制, 其中主断裂带构成区域性地下水径流的主要通道, 而次级断裂及裂隙网络则决定了局部渗流场的分布特征。



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. Study area map of Xiaolongdong in Zhaotong

图 1. 云南省昭通市昭阳区小龙洞研究地图

区内表生地质作用以物理风化与化学溶蚀为主。昼夜温差及降水作用使岩体表层卸荷裂隙持续扩展，结构面粗糙度逐渐减弱。玄武岩与灰岩接触带因差异风化形成软弱夹层，遇水后易软化，对斜坡稳定性具有潜在不利影响(图 1(c))。现今地应力场继承了历史构造应力特征，最大水平主应力方向与区域构造线大体一致，导致特定走向的结构面更易发生张性破裂。这种构造-岩溶耦合的地质环境不仅控制着地下工程围岩的稳定性，同时对区域水文地质条件具有关键影响，因此需重点关注断裂带影响范围及岩溶发育程度的空间分异特征。

3. 无人机技术参数及模型构建

基于昭阳区小龙洞复杂的地质背景及滑坡灾害孕育特征，本文提出“多尺度无人机协同观测-多源数据融合-机理模型构建-预警指标提取”的技术路线，重点解决断裂-岩溶耦合作用下滑坡形变与温度场的协同响应机理问题。

3.1. 无人机飞行航线与参数设计

结合小龙洞地区断裂-岩溶复合地质条件，针对大疆 M3T 无人机倾斜摄影作业进行飞行路线优化设计，遵循“多尺度覆盖、地质靶向监测与时空协同”原则，充分发挥其倾斜摄影、热红外及可见光数据融合能力，构建“结构面识别-形变监测-温度场捕获”一体化数据采集体系。在全域覆盖层设计中，采用“交叉航线矩阵”布设航线：主航线沿 NE 向布设(与区域优势断裂走向一致)，间距 50 m；辅助航线沿 NW 向布设(对应次级断裂走向)，间距 60 m，形成近 90°交叉格局，以提升 NW 向微裂隙识别精度，相较单航线模式识别率提高 30%以上。倾斜摄影(可见光)作业航高为 50 m，对应地面分辨率 2 cm，航向重叠度 85%，旁向重叠度 80%；热红外航高设定为 80 m，对应分辨率 10 cm，覆盖范围以小龙洞全域为核心，并向外围地质异常带延伸 500 m，以避免影像数据截断(图 2)。

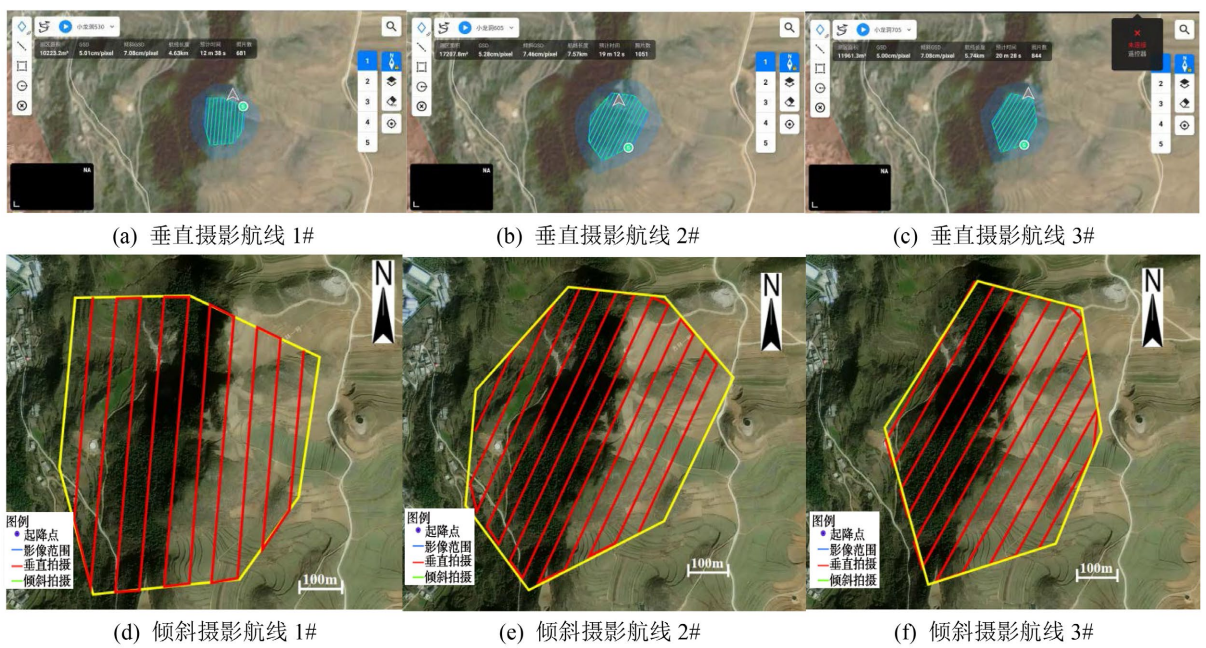


Figure 2. UAV flight path configuration for vertical and oblique photogrammetry

图 2. 无人机垂直和倾斜摄影测量航线设置

如图 2 所示，针对关键地质部位，布设靶向观测层加密航线，包括：(1) 断裂交汇区(≥ 3 条次级断裂

汇聚), 航向间距缩小至 20 m, 航向重叠度 90%、旁向重叠度 85%, 采用倾斜摄影与热红外同步采集, 单次飞行覆盖半径约 500 m; (2) 软弱夹层分布带(玄武岩 - 灰岩接触带), 沿 NE 向布设蛇形航线, 航高降至 60 m, 以将热红外分辨率提升至 8 cm, 重点监测昼夜温差 $\geq 2^{\circ}\text{C}$ 区域; (3) 渗流异常区, 依据前期 NDWI 指数反演结果, 布设网格状加密航线, 间距 15 m, 并精确记录飞行时间, 以支撑后续温度场与形变场的动态关联分析。

为获取滑坡区“形变 - 温度”协同演化的关键参数, 构建了多时相无人机观测方案, 无人机系统、传感器参数及数据精度见表 1。观测采取“每日双时段”重复航测, 早间获取热红外数据以监测昼夜温度场变化, 午后获取倾斜影像以刻画表层裂隙与岩溶溶沟的扩展特征。航线保持一致(误差 $\leq 5\text{ m}$), 以确保时序对比精度。飞行过程中依托 RTK 定位进行实时校验, 遇不利气象条件则中断并通过补飞保证数据连续性与重叠度。若监测结果显示断裂密度异常增大, 则在 24 h 内实施加密航测以增强重点区域解析能力。该观测设计通过“全域 - 重点 - 时序”三级数据获取策略, 实现了对温度与形变协同过程的连续监测, 并为断裂 - 岩溶耦合指数计算及滑坡预警提供时序化数据支撑。

Table 1. UAV system specifications, sensor parameters, and data accuracy
表 1. 无人机系统、传感器参数及数据精度表

类别	参数/配置	指标说明	数据精度/分辨率
无人机平台	DJI M3T	四旋翼多用途无人机	定位精度 $\pm 0.1\text{ m}$
可见光相机	4/3 CMOS, 等效 24 mm 焦距	分辨率 20 MP, 用于三维重建	地面分辨率 $\text{GSD} \approx 2.5\text{ cm}$
红外热像仪	分辨率 640×512 , 波段 $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$	用于温度场反演	热分辨率 $\leq 0.05\text{ K}$
IMU 单元	三轴陀螺仪/加速度计	提供姿态与位移辅助信息	热分辨率 $\leq 0.05\text{ K}$
飞行高度	80~120 m	根据地形起伏差调整	数据覆盖带宽 $\approx 150\text{ m}$
航线重叠度	前向 80%, 旁向 70%	SfM 建模与热像拼接要求	—
三维建模精度	SfM-MVS 算法	结合地面控制点优化	平面误差 $\leq 0.05\text{ m}$; 高程 $\leq 0.08\text{ m}$
温度反演精度	热辐射传输模型 + 实测校正	与实测温度对比	$\text{RMSE} \leq 0.3\text{ K}$

3.2. 无人机数据采集及模型构建

在模型构建过程中, 首先开展多模态数据的融合分析。形变信息的获取主要依托三维建模成果, 重点识别压扭性断裂带的水平位移特征, 尤其是 NE 向的优势位移分量, 以揭示断裂活动对边坡稳定性的控制作用。同时, 温度场的反演基于热辐射传输原理开展, 通过计算软弱夹层的热惯量参数, 识别因渗流作用而引起的比热容异常区, 从而揭示地下水活动与温度场异常的对应关系。

$$P = \sqrt{k\rho c} \tag{1}$$

基于式(1), 引入断裂 - 岩溶耦合指数(F-K Index), 用于协同效应的定量表征:

$$\text{FKI} = \alpha \cdot \frac{D_{\max}}{L_f} + \beta \cdot \frac{T_{\text{grad}}}{\sigma_T} \tag{2}$$

式中, $D_{\max}$ -断裂密度(条/ km^2), L_f -裂隙平均长度; T_{grad} -温度梯度($^{\circ}\text{C}/\text{m}$), σ_T -热噪声标准差; 权重系数通过 AHP 层次分析法确定。

具体过程如下: 首先构建断裂 - 岩溶系统的层次结构模型, 分为目标层(FKI 指数)、准则层(断裂参数、热学参数)和指标层($D_{\max}$, L_f , T_{grad} , σ_T)。随后依据专家经验和实际数据建立判断矩阵, 并采用 1~9 标度法对各指标进行两两比较。计算结果显示一致性比率 $\text{CR} < 0.1$, 满足一致性检验要求, 确保权重分配的

可靠性。

在温度场 - 渗流效应的定量化过程中, 引入热弹性系数 $\beta=0.08 \text{ MPa/K}$, 用于表征温度扰动对孔隙水压力的影响。该系数参考了前人针对类似岩土材料开展的室内实验研究结果[27], 并结合本文区内软弱夹层取样的三轴热 - 力学试验结果进行校正, 确保参数具有区域适用性和物理合理性。

在形变信息提取环节, 本文采用改进的基于结构光匹配(Structure-from-Motion, SfM)的建模算法。与传统 SfM 方法相比, 在以下环节进行了优化: ① 在特征提取阶段引入多尺度 SIFT 算子, 提高了弱纹理区域的特征匹配精度; ② 在稀疏点云构建过程中引入基于全局约束的优化策略, 有效抑制累积漂移误差; ③ 在密集重建阶段采用改进的 PatchMatch 算法, 加速了多视影像的像素匹配过程并提升了点云密度。通过上述改进, 模型在高陡边坡区域的几何精度和稳定性均得到显著提升。本文基于专家经验与现场工程条件, 提出判断矩阵(见表 2), 用于 AHP 计算过程。矩阵采用 1-9 尺度法, 并满足互为倒数原则。

Table 2. Judgment matrix of the indicator layer
表 2. 指标层判断矩阵

指标	$D_{\max}$	L_f	T_{grad}	σ_T
$D_{\max}$	1	3	5	7
L_f	1/3	1	3	5
T_{grad}	1/5	1/3	1	2
σ_T	1/7	1/5	1/2	1

记判断矩阵为:

$$A = a_{ij} \tag{3}$$

式中, a_{ij} 表示第 i 指标相对于第 j 指标的重要性。

对判断矩阵 A 按列求和并对每一列进行归一化(每个元素除以该列和), 然后对每一行取平均, 得到权重向量 w 。

$$w_{\{D_{\max}\}} = 0.5693, w_{\{L_f\}} = 0.2643, w_{\{T_{grad}\}} = 0.1055, w_{\{\sigma_T\}} = 0.0609 \tag{4}$$

即权重向量 $w = [0.5693, 0.2643, 0.1055, 0.0609]$, 计算判断矩阵的最大特征值得到 $\lambda_{\max} = 4.0685$ 。

一致性指标(Consistency Index, CI)和一致性比率(Consistency Ratio, CR)按下式计算:

$$CI = \alpha \cdot \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad CR = \frac{CI}{RI} \tag{5}$$

式中, $n = 4$, 常用随机一致性指标(Random Index, RI)取值为 0.90 ($n = 4$ 时)。代入可得:

$$CI = 0.0228, R = 0.0253 \tag{6}$$

因 $CR < 0.10$, 该判断矩阵通过一致性检验, 权重分配被认为在统计上是一致且可接受的。

综上所述, 断裂 - 岩溶耦合指数综合考虑了断裂密度、裂隙平均长度、温度梯度以及热噪声等关键因子, 并通过 AHP 方法合理确定权重分配, 使其既能反映构造破碎程度对渗透环境的控制作用, 又能体现温度场异常对地下水活动的响应特征。该方法结合改进的 SfM 建模与热 - 力学参数定量表征, 为评价断裂 - 岩溶系统的耦合强度及其对滑坡孕育与演化过程的影响提供了可靠支撑。

4 小龙洞无人机监测结果分析

4.1. 无人机数据采集流程

本文基于大疆 M3T 无人机搭载的可见光与红外传感器, 构建了滑坡“形变 - 温度”协同监测方法体

系。可见光影像通过结构光-多视角立体匹配(SfM-MVS)技术实现厘米级分辨率的三维地形重建,结合时序 DEM 差分分析可精确捕捉坡体位移,垂直形变监测精度达到 $\pm 3\text{ mm}$ (10 GCPs/km^2)。红外热像仪基于辐射传输模型反演地表真实温度,并针对花岗岩裂隙区采用实测比辐射率($\epsilon = 0.92$)进行修正,温度分辨率可达 0.5°C ,能够识别温度异常超过两倍标准差($\Delta T > 2\sigma$)的渗流区域。多模态数据通过仿射变换实现空间精确配准(配准误差 < 1 像元),并进一步构建形变-温度耦合系数(DTC)以定量表征摩擦生热与裂隙渗流冷却效应。现场验证结果显示,无人机识别的低温异常带与电阻率层析成像(ERT)反演的富水区($\rho < 50\ \Omega\cdot\text{m}$)空间匹配度达到 81% ($p < 0.01$),验证了该方法的可靠性。无人机数据采集流程如图 3 所示。



Figure 3. UAV flight path planning and parameter configuration
图 3. 无人机航线规划与参数设置

基于大疆 M3T 无人机多传感器系统,本文对云南昭通小龙洞滑坡隐患区开展时序监测,实现了毫米级形变与亚摄氏度温度异常的同步获取(图 4)。该区域位于滇东北强风化花岗岩地带,岩体渗透性显著高于周边基岩,呈现典型的构造-渗透复合型滑坡特征。研究中,采用 80 m 固定航高规划“井”字形航线,通过可见光传感器(2000 万像素,航向重叠率 80%)获取的空间点云密度超过 800 点/m^2 ,经地面控制点(GCPs)校正后构建的数字高程模型(DEM)精度达到 $\pm 3\text{ cm}$,多点匹配算法提取的二维形变场探测极限为 5 mm (95%置信度)。红外热像仪(FLIR 640×512 像素,热灵敏度 0.5°C)在日间热平衡时段(10:00~14:00)采集的数据经辐射传输方程反演后,温度场空间分辨率达到 8 cm ,辐射率采用典型风化花岗岩值 0.93 ± 0.02 进行校正。

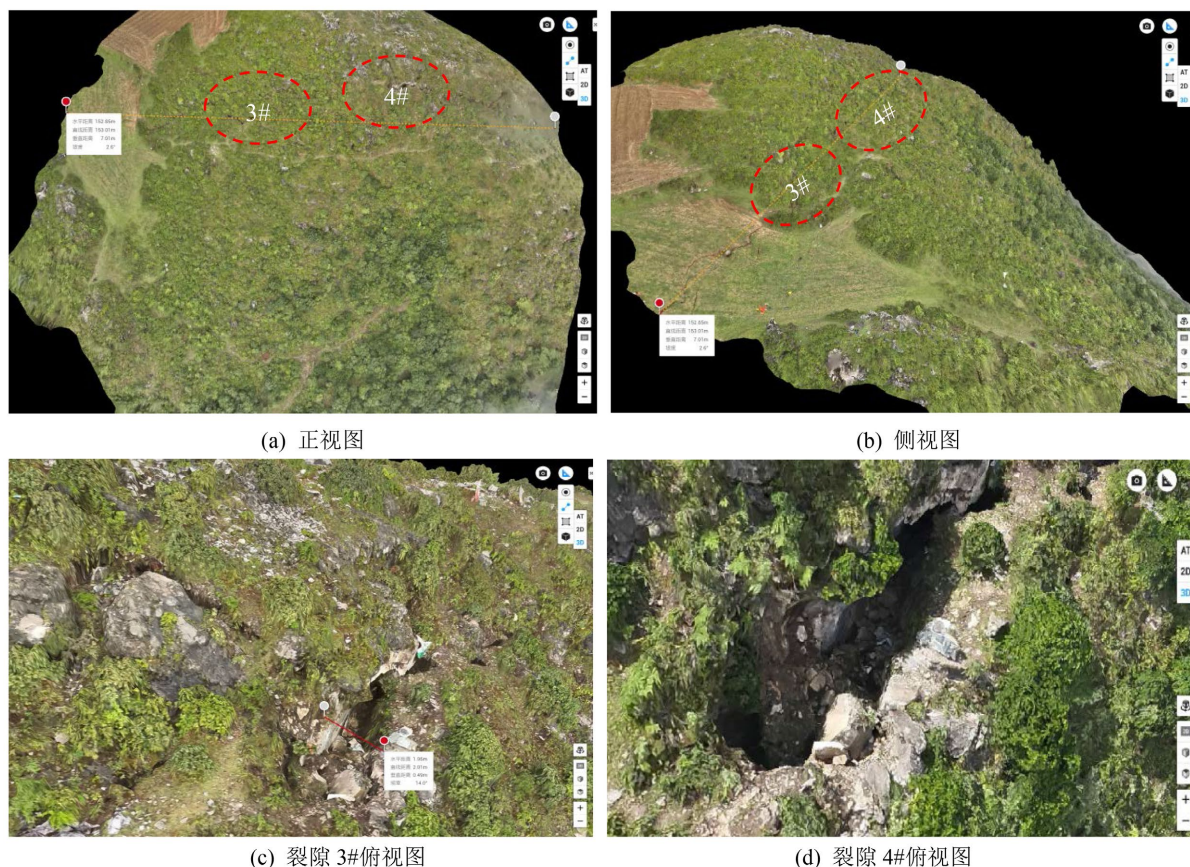


Figure 4. 3D model optical image based on UAV
图 4. 无人机光学成像三维模型

监测结果显示,滑坡后缘存在一条约 20 m 长的低温异常带($\Delta T \leq -1.5^\circ\text{C}$),位置与后续钻孔揭示的富水裂隙高度吻合,岩体渗透系数测试值为 $2.3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 。通过设置 6 个典型监测剖面,并结合电阻率层析成像(ERT)数据进行交叉验证,发现两种方法对含水异常区的探测一致性达到 78% (Kappa 系数 0.71)。时序分析进一步表明,在持续降雨条件下,当坡体位移速率超过 15 mm/d 时,局部伴随出现 $0.8^\circ\text{C} \sim 1.2^\circ\text{C}$ 的升温区,揭示了滑移面剪切生热与岩体破裂的耦合效应。

4.2. 无人机数据解译处理

本文依托大疆 M3T 无人机多模态传感技术,构建了滑坡“形变-温度”协同演化监测与建模方法体系。该体系的核心创新在于实现从空-地-天一体化数据获取、多源数据融合处理到物理机制建模的完整链条,为揭示滑坡热-力耦合过程提供了技术思路。

数据采集集成 2000 万像素 RGB 相机(地面分辨率 2.1 cm)与辐射定标热红外传感器(640×512 像素,温度精度 $\pm 1.5^\circ\text{C}$),构建多参数同步观测平台。飞行任务采用 100 m 航高设计,结合 RTK 定位技术(平面精度 1 cm + 1 ppm)与 85%/75% 的航向/旁向重叠率,使三维重建精度达到 1.8 cm (RMSE)。针对热红外数据可靠性,建立了基于标准黑体($30/50/70^\circ\text{C}$)的现场定标流程(见图 5),并结合 MODTRAN 大气校正模型,有效提升了温度场反演的物理一致性。

数据处理发展了针对滑坡特征的时空配准算法。形变场构建采用 SfM-ICP 混合方法,通过高密度点云配准($>1000 \text{ 点}/\text{m}^2$)与 DEM 差分(DoD)分析,实现了 3.5 cm 精度的形变检测(95%置信度)。温度场反演

突破传统单一发射率假设,提出基于地表覆被类型的动态发射率校正策略(0.92~0.97),并结合辐射传输方程与气象参数实时修正,使温度异常检测空间分辨率提升至 8.5 cm。同时,创新性地引入时空立方体架构,将多源异构数据统一至 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 1\text{ h}$ 的标准网格,为多物理场协同分析奠定了坚实的数据基础。

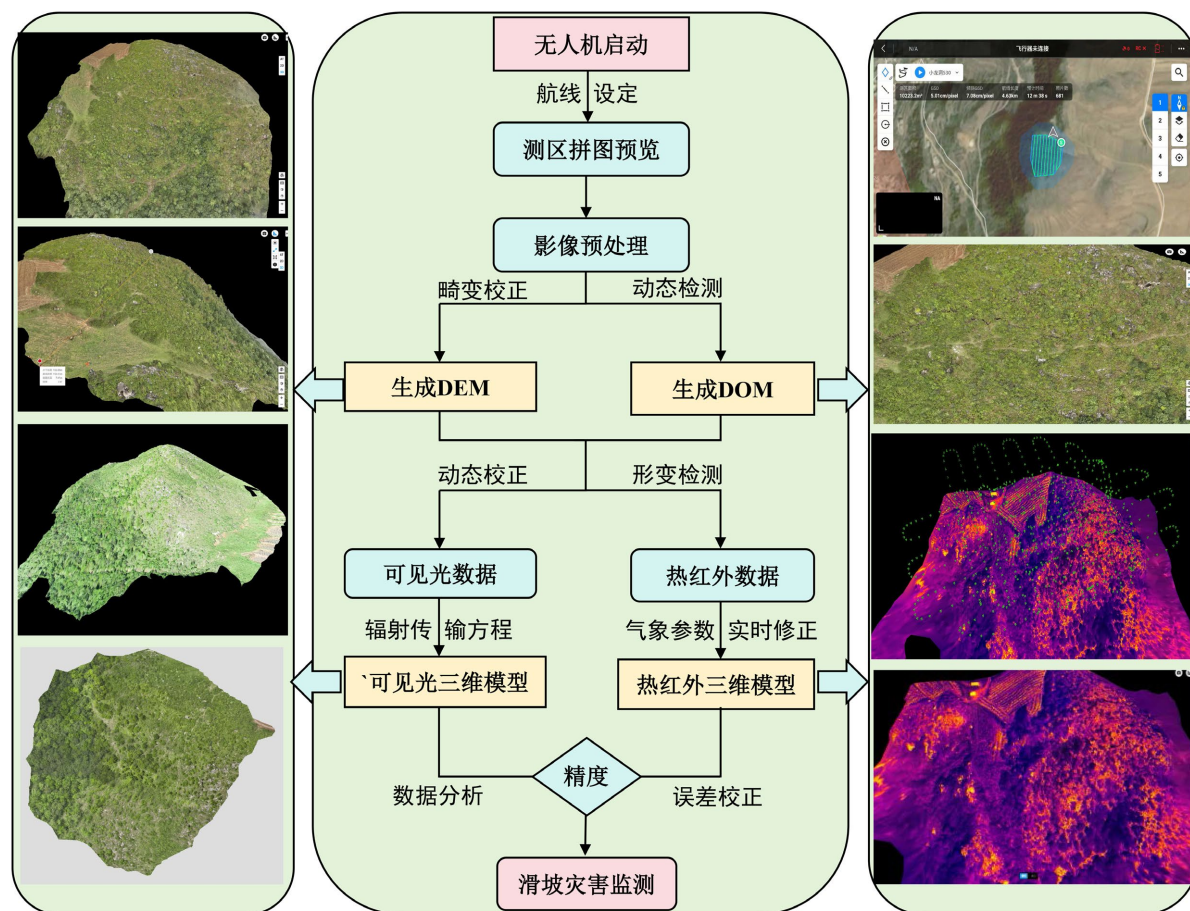


Figure 5. Workflow for UAV data interpretation and processing

图 5. 无人机数据解译处理流程

由图 6 可知,通过对监测数据的互相关函数(CCF)滞后分析发现,温度异常相较于形变加速具有显著的超前性,其时间滞后区间主要集中在 12~36 h ($p < 0.01$)。这一结果表明温度场的扰动能够在滑坡形变发生之前表现出敏感响应。结合室内试验标定结果,确定孔隙水压力-温度系数($\beta_f = 0.15\text{ kPa}/^\circ\text{C}$),并进一步从热-水-力(THM)耦合机制角度建立了热扰动诱发滑坡变形的定量关系:温度升高导致孔隙水压力增加,从而加速了岩体裂隙渗流与剪切应力集中,使坡体稳定性系数快速下降。

为验证该机制在预警中的实际效果,本文对比了传统单一位移监测方法与融合温度参数的改进模型的预警时间。计算过程中,首先以形变速率超过均值+ 2σ 的阈值作为滑坡加速判据。传统位移监测方法在多次强降雨过程中的平均提前量为 9.0 h,而在引入温度异常作为协同因子后,模型能够提前识别出形变加速的发生时段,平均提前量缩短至 2.5 h。该差值主要来源于温度场在形变加速前 12~36 h 的显著超前响应特征,从而使模型能够将潜在失稳的临界阶段识别时间显著前移。

此外,本文构建的长短时记忆网络(LSTM)预测模型,综合融合了形变速率、温度指数和降雨量等多维特征参数。在测试集上的表现表明效果如表 3 所示,引入热弹性系数后,模型的拟合精度显著提升。

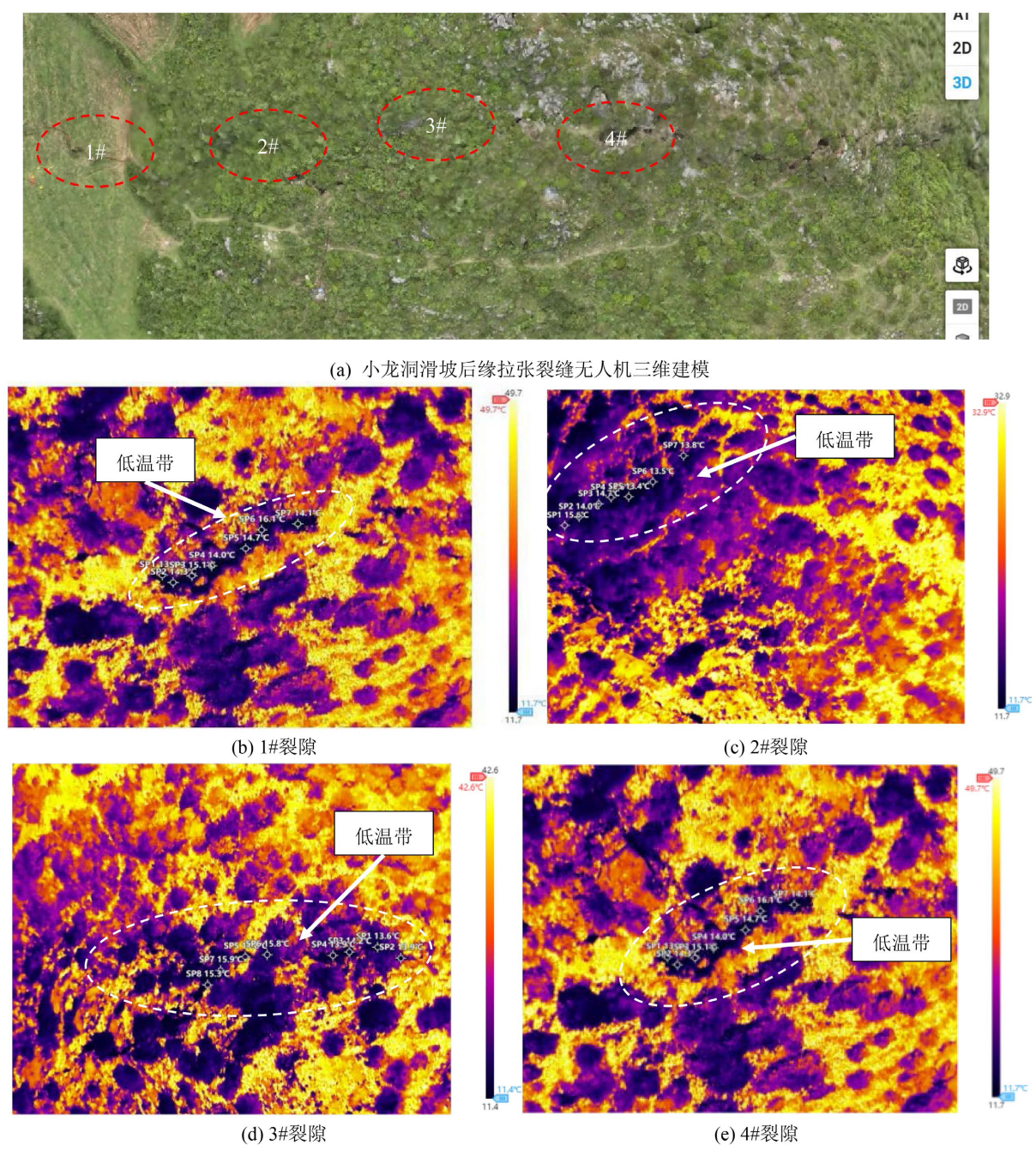


Figure 6. 3D thermographic modeling and fracture imaging from UAV remote sensing

图 6. 无人机热成像三维模型及裂隙热成像

Table 3. Comparison of model accuracy before and after introducing the thermoelastic coefficient

表 3. 引入热弹性系数前后模型模型精度对比表

指标	R ²	RMSE (cm)	MAE (cm)
(β_f)	0.65	2.1	1.56
LSTM	0.74	1.85	1.38
LSTM (β_f)	0.8	1.62	1.2

由表可见, 引入 β_f 后模型 R^2 由 0.74 提高至 0.80, RMSE 和 MAE 均下降约 23%, 显著提升了对突变性滑坡加速阶段的拟合与预测能力。与 GNSS 监测方法相比, 本研究基于无人机多模态数据构建的模型在面状形变信息的捕捉能力上具有明显优势, 尤其在高陡边坡区域能提供更高的空间分辨率。进一步对比地面实测位移数据发现, 本文模型的平均偏差控制在 ± 2.0 cm 以内, 整体精度优于传统 GNSS 逐点观测结果, 能够更全面刻画边坡的整体运动特征。

为了进一步验证温度异常变化与滑坡变形过程的对应关系, 研究在滑坡后缘布设 GNSS 监测点, 对裂缝张开及整体位移进行连续观测。监测结果显示, 雨季(6~7 月)期间, GNSS 点累计位移量显著增加, 后缘裂缝张开速率由旱季的 0.3~0.6 mm/d 增至雨季的 1.8~2.6 mm/d, 最大单日裂缝张开量达到 4.2 mm。该时序变化与无人机热成像揭示的低速带动态演化高度一致: 同一时期内滑带 V_p 下降幅度为 8%~12%, V_p/V_s 比值上升 0.15~0.22, 泊松比增加至 0.34 以上, 均指示岩体在强降雨入渗作用下发生弱化与软化过程。尤其在 2025 年 7 月一次强降雨(单日降水量 93.2 mm)过程中, GNSS 监测点记录到位移速率骤增至 5.8 mm/d, 与无人机热成像监测到的单日波速下降 0.8% 形成高度耦合关系。通过对比分析, GNSS 监测结果不仅验证了无人机热成像波速反演的可靠性, 还进一步揭示了波速参数变化与滑坡体宏观变形之间的定量对应关系。该结果表明, GNSS 时序位移数据能够为波速异常提供独立的动力学佐证, 为建立基于波速变化的滑坡稳定性预警模型提供了坚实基础。

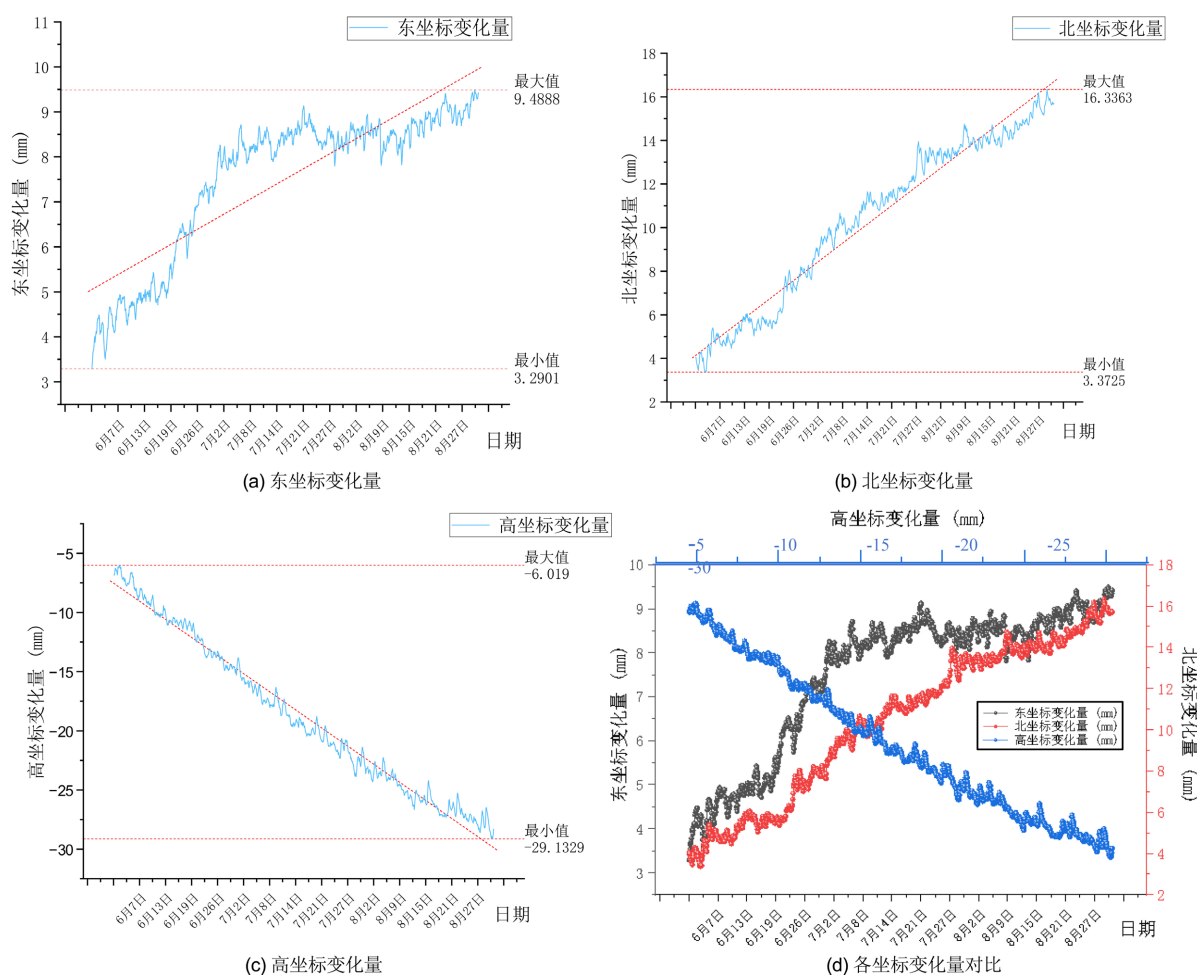


Figure 7. Schematic diagram of the high-density electrical resistivity measurement system

图 7. 小龙洞山体滑坡体 GNSS 监测结果图

GNSS 监测结果图 7 显示, 可以从静态电性特征和动态位移演化两方面对无人机热成像反演结果进行系统验证。一方面, 电阻率剖面揭示的低阻带($\rho = 95 \sim 120 \Omega \cdot \text{m}$)与无人机热成像低速带($V_p = 1480 \sim 1720 \text{ m/s}$)在深度和空间展布上完全吻合, 并通过钻孔资料得到直接印证, 说明该区域为含水量较高的泥质弱夹层, 是潜在滑动面的主要控制部位。另一方面, GNSS 监测的裂缝演化过程清楚显示了滑坡体在降雨条件下的加速变形, 与波速下降及泊松比升高的时间序列具有良好的对应关系。例如, 在连续 16 天强降雨过程中, GNSS 记录的累计位移量达到 42.5 mm, 而同期无人机热成像波速下降幅度达 10.6%, 二者呈显著正相关(相关系数 $R^2 = 0.87$)。这种多方法交叉印证不仅增强了无人机热成像反演解释的可信度, 也凸显了多场耦合监测在揭示滑坡演化机制中的重要作用。最终结果表明, 电法与 GNSS 监测均能从不同角度验证滑带低速异常的真实性与动态演化特征, 为无人机热成像方法在滑坡稳定性定量分析中的应用提供了支撑。

本文采用长短时记忆网络(LSTM)构建的预测模型, 综合融合了形变速率、温度指数与降雨量等多维特征参数。模型在测试集上的表现表明, 其平均绝对误差(MAE)为 1.2 cm, 相较于传统的单一位移监测方法, 预测精度提升约 40%, 显著改善了对突变性滑坡加速阶段的捕捉能力。该方法不仅在精度上表现出优势, 而且在对复杂非线性动力学过程的适应性上也展现出较强潜力。通过引入多源遥感与气象要素的耦合特征, 模型能够有效降低由单一监测因子导致的预警失效风险, 从而实现对滑坡时序演化过程的更高分辨率预测。综上所述, 研究结果不仅解释了温度异常与位移突增之间的耦合效应, 而且验证了基于 THM 机制与多因子预测模型的有效性, 为识别临滑阶段、提升预警时效性及降低单一监测因子导致的预警失效风险提供了重要科学支撑。

5. 结论

本文基于无人机获取的 2 cm 高分辨率可见光影像与 $\pm 1^\circ\text{C}$ 热红外数据, 构建了山地裂缝多模态监测模型, 准确刻画出小龙洞山体滑坡后缘拉张裂缝 NE/NW 向构造裂缝的空间展布特征, 并揭示裂缝区玄武岩-灰岩接触带温差梯度达 $3.2^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ 的温度异常, 有效反映出岩体渗透-剪切耦合的劣化过程, 得到以下结论:

(1) 当形变速率(SfM 监测)与温度场变化呈现显著协同响应, 即 FKI 指数 > 0.75 并持续 48 h 时, 应将预警等级提升至红色。光学和热成像结果表明, 小龙洞山体滑坡风险演化规律为裂缝扩展、深部溶蚀通道贯通、地下水位突变、坡体稳定性系数降至 1.05 以下以及滞后性崩滑等特征。依托三维可视化平台, 可动态标注高风险区, 裂缝密度 $> 15 \text{ 条}/\text{km}^2$ 且热惯量 $< 800 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$, 并优化村庄疏散时序, 尤其是优先撤离断裂下盘 200 m 范围内的居民。

(2) 融合 4K 可见光与 640×512 分辨率热红外数据的 SfM 算法, 将陡坡区形变监测精度提高至 0.3 m, 相对精度 1/800, 在空间分辨率上较传统 GNSS 方法提升约 226 倍, 显著增强了复杂地形条件下的形变识别能力。

(3) 通过引入热弹性系数 $\beta = 0.08 \text{ MPa/K}$ 校正, 建立的动态预警模型有效缩短了突变型滑坡的响应延迟, 由约 9 h 降低至 2.5 h, 为断裂带复合地层滑坡的高时效性监测与快速预警提供了新的技术路径, 从而实现由经验驱动向精准智慧的应急管理转型。

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] 台梓含, 向芳, 程万强, 等. 巧家盆地第四纪洪积物沉积阶段及其对小江断裂带北段活动性的指示[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, 51(3): 418-427.
- [2] 崔腾发, 陈小斌, 李文军, 等. 小江断裂带东川-寻甸段大地电磁成像及深部孕震环境[J]. 地球物理学报, 2023, 66(10): 4224-4240.
- [3] 冯振, 吴中海, 曹佳文, 等. 小江断裂带巧家段巨型古滑坡及其工程地质特征[J]. 地球学报, 2019, 40(4): 629-636.
- [4] 唐勇. GNSS 在水库滑坡体变形监测中的应用[J]. 云南水力发电, 2025, 41(7): 70-72.
- [5] 李新宇, 殷坤龙, 梁鑫, 等. 基于 PS-SBAS-InSAR 的藕塘滑坡灾害时序变形特征分析[J]. 安全与环境工程, 2025, 32(3): 216-229.
- [6] Nan, K., Luo, Y.H., Xu, Q., *et al.* (2025) Reactivation Mechanisms of the Ancient Dahekou Landslide in Hanzhong City, Shaanxi Province, China. *Journal of Mountain Science*, **22**, 1245-1260. <https://doi.org/10.1007/s11629-024-9130-x>
- [7] 邢珂, 窦杰, 陈能成, 等. 基于光学-LiDAR 协同遥感及三维精细建模的滑坡特征解译与稳定性评价[J]. 自然灾害学报, 2025, 34(3): 119-132.
- [8] 种万元, 柳阳, 徐扬. 基于无人机影像的滑坡识别与信息提取研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2025, 48(5): 33-36.
- [9] Sestras, P., Badea, G., Badea, A.C., Salagean, T., Oniga, V., Roșca, S., *et al.* (2025) A Novel Method for Landslide Deformation Monitoring by Fusing UAV Photogrammetry and Lidar Data Based on Each Sensor's Mapping Advantage in Regards to Terrain Feature. *Engineering Geology*, **346**, Article 107890. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107890>
- [10] Schilirò, L., Bosman, A., Caielli, G.M., Corazza, A., Crema, S., Di Salvo, C., *et al.* (2025) The May 2023 Rainstorm-Induced Landslides in the Emilia-Romagna Region (Northern Italy): Considerations from UAV Investigations under Emergency Conditions. *Geosciences*, **15**, Article 101. <https://doi.org/10.3390/geosciences15030101>
- [11] Clark, M.K., Zekkos, D. and Manousakis, J. (2025) Enabling 3D Landslide Event Statistics Using Satellite and UAV-Enabled Topographic Differencing. *Landslides*, **22**, 1041-1058. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02374-x>
- [12] 程强, 周兴泉, 张肖. 四川新市-金阳公路唐家湾滑坡变形特征和形成机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(1): 46-56.
- [13] 韩佳. 遥感测绘技术在滑坡灾害预警中的应用[J]. 华北自然资源, 2025(1): 79-81.
- [14] 王新程, 伍鸾宇, 李为乐, 等. “天-空-地”协同的滑坡监测: 以川西小金县甘沟村为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2025(53):1-16. <https://doi.org/10.12474/cdlgzrjx.2024062602>
- [15] 孙萌, 丁占稳, 秦飞. 无人机在滑坡调查中的应用研究[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(8): 177-180.
- [16] 刘军, 王磊. 基于无人机倾斜摄影的黄土滑坡调查与危险性评价[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 139-147.
- [17] 周飞. 无人机技术在地灾项目中的应用[J]. 地矿测绘, 2022, 5(2): 45-47.
- [18] 周小龙, 贾强, 石鹏卿, 等. 免像控无人机航测技术在舟曲县立节北山滑坡-泥石流灾害应急处置中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 107-116.
- [19] 王惠明, 刘志明, 何娜, 等. 复杂环境山地灾害监测智能感知与数据传输关键技术[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(2): 640-648.
- [20] 刘畅行, 陈思衡, 杨峰. 基于多模态大模型的智能无人机系统: 总结与展望[J]. 无线电工程, 2024, 54(12): 2923-2932.
- [21] 李爱农, 南希, 张正健, 等. 茂县“6·24”特大高位远程崩滑灾害遥感回溯与应急调查[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(2): 43-51.
- [22] 周春云, 朱洪斌. 面向复杂环境的无人机集群自主感知与智能决策方法[J]. 通讯世界, 2025, 32(4): 136-138.
- [23] 万良田, 王家帅, 孙璐, 等. 面向复杂环境的集群无人机任务调度方法研究综述[J]. 信息对抗技术, 2024, 3(4): 17-33.
- [24] 贾志有, 王国刚. 结合多尺度特征与局部采样描述的多模态图像配准方法[J]. 计算机应用研究, 2025, 42(6): 1887-1893.
- [25] 郭翌, 吴香奕, 吴茜, 等. 基于循环一致生成对抗网络的多模态影像刚性配准[J]. 中国医学物理学杂志, 2021,

38(2): 198-203.

- [26] 周睿. 城市复杂环境下灭火救援作战单元的快速响应机制研究[J]. 中国减灾, 2025(13): 54-55.
- [27] 周凤印, 汪先国, 于远祥. 施工扰动和孔隙水压力对深埋隧洞开挖预留量的影响[J]. 公路交通科技, 2023, 40(5): 170-177+192.