

测绘与地理信息在地质灾害监测预警中的应用

李京富

鸿儒勘测设计有限公司广西分公司 广西 南宁 530031

【摘要】：我国地质灾害分布广、发生突发、危害大，原有的人工巡查、群测群防无法实现覆盖范围、时效性、隐患捕捉等方面的有效突破，测绘与地理信息技术的发展解决了人工巡查、群测群防无法实现的这些瓶颈，其对于地质灾害监测预警的主要价值体现在“天—空—地”一体化的空间数据获取能力，实现从宏观到微观的全域感知、地理信息系统的空间分析功能、多源数据在统一空间的融合能力以及建立灾害易发性评价和危险性区划的科学基础、以及空间信息与实时监测数据联动能力，进行精准预警等方面。论文介绍了卫星遥感（InSAR）、航空遥感（无人机）、地面监测（GNSS/北斗）和地理信息系统在地质灾害监测预警中的原理与效果，并结合贵州省 InSAR 地质灾害隐患识别数据实证分析了测绘与地理信息技术在实际工作中的应用效果，并对技术融合与体系建设提出了展望。

【关键词】：测绘；地理信息；地质灾害；监测预警

DOI:10.12417/2811-0528.26.13.078

引言

测绘与地理信息是获取、处理、分析、管理地球表层空间数据的基本技术，其在地质灾害领域的应用是从灾害调查、早期识别、监测预警、应急响应和灾后评估等层面的问题。地质灾害的发生往往遵循时空规律，滑坡、泥石流、崩塌等灾害都发生在一些特殊的地质构造带、地形地貌区和降雨敏感区，这为测绘与地理信息的技术应用提供了理论基础。随着遥感技术、全球导航卫星技术、地理信息系统和人工智能技术的迅速发展，测绘与地理信息对于地质灾害监测预警的作用日益凸显。根据相关研究，InSAR 可以实现毫米级的地表形变监测，覆盖面广、成本低；无人机遥感可以利用无视角和不受地面影响的特点，获得复杂山区地质灾害发育分布情况。GIS 可以为多源数据的空间叠加、灾害易发性评价、危险性区划提供统一平台。基于此，本文将测绘与地理信息作为地质灾害监测预警的关键因素，从卫星与航空遥感监测、地面监测与地理信息集成分析两个角度论述其原理及应用价值，并结合实践进行案例分析。

1 卫星与航空遥感在地质灾害监测中的应用

1.1 卫星遥感监测

卫星遥感由于有宏观覆盖能力可周期性获取地表影像，为隐患排查提供支撑。INSAR 利用雷达影像相位差反演毫米级地表形变，可以获取灾害前蠕变过程。2025 年贵州省 INSAR 监测发现，累计下发疑似隐患点 218 处（形变 $<10\text{cm}$ 的 155 处， $\geq 10\text{cm}$ 的 63 处），核查确认隐患点 17 处，新增 6 处，可以验证 InSAR 的早期识别。青藏高原古巴滑坡中 INSAR 发现面积 0.17km^2 ，体积 840万 m^3 ，2007—2023 年累积位移 1.37m ，滑动深度 94m ，无人区可替代。时序 InSAR 分析形变速率加

速趋势判断临滑阶段。光学遥感影像直观易判读，高分辨率影像可清晰的显示滑坡形态，通过深度学习可自动提取，基于 CNN 的滑坡识别模型平均交并比达到 0.75 以上，优于传统方法的 0.55。光学遥感在灾后快速评估方面，2024 年云南镇雄滑坡中利用灾后 15 分钟获得的高分四号影像和灾前高分二号影像进行变化检测，2 小时内完成滑坡范围确定和房屋损毁估算。高分辨率光学影像与 INSAR 相结合，可以形成“发现变形—确认形态—评估灾害”的链条。

1.2 航空遥感监测

1.2.1 无人机在地质灾害应急监测中的不可替代性

无人机应急监测的主要作用是“快”、“准”。如 2025 年 2 月 8 日，四川筠连县沐爱镇金坪村山体滑坡发生后，应急管理部国家减灾中心通过无人机联合调度，调度 4 支队伍 11 人，驾驶 15 架无人机及可见光、LIDAR、热红外等载荷驰援，16 时 30 分到达后，即开始飞行，飞行 18 架次，巡查 8.3公里 ，监测面积 5平方公里 ，获得全景图 10 幅、视频 28 段、照片 20 余张，支撑滑坡范围、房屋损毁、二次滑坡风险研判。以往人工调查需经过数天才能基本达到同等评估效果，无人机仅数小时即可完成采集与初步处理；搭载的高分辨率相机能生成厘米级正射影像与三维模型，可精确识别单栋房屋损毁、道路断裂等重要信息；贵州大方县果瓦乡山体滑坡应急监测调度固定翼、多旋翼无人机及各类载荷开展应急监测及辅助救援，无人机应急监测已成为我国地质灾害应急响应体系的重要组成部分。此外，无人机还可用于灾后的持续性监测，即巡查滑坡体二次变形与次生灾害风险，为重建和风险管控提供动态数据支撑。

1.2.2 无人机 LiDAR 在植被覆盖区滑坡探测中的突破

植被茂密的山区光学遥感无法穿透植被获取真实地表形态, 无人机 LiDAR 可以穿透植被获取高密度三维点云, 生成高精度 dem 获取被植被遮挡的滑坡地形、裂缝等微地貌。相比于光学影像, LiDAR 直观显示裸地表形态, 对识别古滑坡复活、微裂缝扩大等隐蔽灾害具有重要意义。无人机 LiDAR 点云密度可达 50~200 点/m², 高程精度大于 10 厘米, 可辨识宽度数十厘米的裂缝。针对西南山区降雨型滑坡监测预警研究中, 科研团队通过卫星 InSAR、无人机 LIDAR、地表与深部变形监测等多源数据建立真三维地质模型, 进一步提升精细化预警能力。已成功应用于三峡库区及四川凉山州等地, 2002 年至今 24 年监测防控区 0 伤亡, 成功预警曾家棚、黄连树等多个滑坡。在四川茂县新磨村滑坡灾后调查中, 无人机 LIDAR 快速获取高精度 DEM, 得到滑坡体积约 1800 万立方米, 为灾害定级和成因分析提供重要数据支持。无人机 LIDAR 是解决“植被遮挡”一直困扰地质灾害调查的有效方法。

2 地面监测与地理信息集成分析

2.1 地面监测与定位技术

地面监测是地质灾害预警的“最后一公里”, 主要是地质灾害的高精度、高频次实时监测, 以 GNSS/北斗联合多源传感网络为主要手段: RTK 可以全天实现毫米级三维形变监测, 直接获得东西、南北、垂直的位移, 有别于 INSAR 的单方向观测; 北斗更适合复杂山区, 具备短报文功能, 可以破解偏远山区数据传输问题。湖北黄冈联合 5G 与北斗, 累计获取有效形变信号 7 次, 预警 2 次滑坡, 广西三江同乐乡北斗云平台发现坡体倾角异常与降雨强度相关性达到 0.87, 提前 30 分钟预警转移 97 人。PPP 无需地面基准站, 可以在无网络区域厘米级定位。单一监测手段能力有限。GNSS/北斗可以联合深部位移计、裂缝计、雨量计、土壤含水率传感器等, 建立涵盖地表、深部变形、降雨等方面的实时监测网络, 多参数相互校验。安徽黄山智能监测预警平台采用 336 个高频雨量站 (10 分钟/次)、1236 台 (套) GNSS 设备, 基于实景三维底座建立实时感知网络, 2021 年来指导转移群众 2 万余人, 实现由“单点监测”到“网络化感知”, 从“事后分析”到“实时预警”的转变。

2.2 地理信息系统集成分析

2.2.1 灾害易发性评价与危险性区划

地质灾害的发生受地形地貌、地质构造、岩土类型、水文条件、人类活动等各种因素的影响, GIS 可以将各因素在统一坐标系下叠加, 构建多因子评价模型, 定量评价地质灾害的空间易发性。常用评价方法包括信息量法、确定性系数法、层次分析法、逻辑回归法、随机森林法, 基本都是通过 GIS 提取

各个评价因子的空间分布图, 计算各个因子对灾害的贡献权重, 得到易发性分区图。该课题以广西象州县 ArcGIS 为模型平台, 选取地貌类型、地质构造、工程地质岩组、地形坡度、岩溶发育程度、斜坡结构、植被覆盖度和人类工程活动 8 个评价指标进行评价。在此基础上加入不同重现期 (10、20、50、100 年一遇) 的 24 小时降水量指标, 得到不同降雨工况的地质灾害危险性级别分布, 评价结果说明降雨工况重现期越大, 地质灾害高危险性及极高危险性分布面积越大, 降雨对地质灾害的影响越大。这种基于 GIS 的空间分析结果为地质灾害预警预报和防灾规划提供了直接依据。比如易发性评价结果用于地质灾害隐患点排查优先顺序——易发性大的地区应加大排查频次; 危险性区划结果用于国土空间规划及工程建设选址——高危险区应控制新增居民点和重大工程。

2.2.2 实景三维技术赋能精准预警

二维 GIS 地图无法充分显示地形起伏、坡向朝向、裂缝分布等三维空间信息, 对于滑坡运动趋势、危险范围划定、避险路线等方面存在先天性缺陷。实景三维技术, 将地理信息系统从平面抽象表达提升到立体真实再现。实景三维模型利用倾斜摄影测量获得高精度三维网格模型, 其纹理、几何精度高, 可任意旋转、放大、漫游模型内部, 直观观察滑坡体整体形态及细节情况。黄山市利用倾斜摄影测量技术, 在全市 94 处重要地质灾害隐患点建立高分辨率实景三维模型, 立体展示滑坡方向、裂缝位置、监测点位、应急预案、避险路线等细节。基于 2 米格网 DEM 数据将全市划分为 73625 个斜坡单元, 统计分析后分组至乡镇一级预警单元, 将区域预警从“无到”, 精准靶向”。结合实景三维模型、隐患点空间分布、监测设备位置等高精度地理信息数据, 高频实时感知数据和人工智能算法, 建立了实时定向预警模型, 将预警的时效从“24 小时”缩短为“10 分钟”。即当监测数据触发预警时, 10 分钟内自动生成隐患点名称、范围、受威胁人数、转移路线等信息, 定向推送给相关责任人及受威胁群众。通过实景三维精准预警提高了预警信息的可操作性, 是测绘与地理信息技术助力地质灾害防治的典范。

3 案例分析: 贵州省 InSAR 地质灾害隐患识别实践

3.1 监测实施与结果

贵州省 InSAR 采用 Sentinel-1A 卫星作为主要数据源, 采用的该卫星具有时间分辨率较高 (重访周期 12 天)、空间分辨率较小 (5m×20m), 适合大范围的周期性形变监测; 为了在植被覆盖度较高的复杂山区采用 AIOS-2 卫星 (L 波段, 重访周期 14 天), 由于 L 波段的雷达波对植被具有一定的穿透能力, 可以有效获取茂密植被覆盖区的地表形变信息, 弥补 Sentinel-1C 波段雷达波穿透力不足的缺陷。在技术方法上主要

采用 SBAS-INSAR 时序分析,通过对多时相 SAR 影像的处理,反演出研究区地表在监测时段内累计形变量和年均形变速率。数据处理流程: SAR 影像配准、干涉图生成、相位解缠、大气相位校正、轨道误差去除、形变时序反演,最终形成研究区的形变速率图和累计形变图 2025 年 1 月-5 月,贵州省 InSAR 监测系统累计获取并下发疑似隐患点 218 处。经分类统计,形变量小于 10cm 的变形点 155 处,占比约 71.1%;形变量大于等于 10cm 的变形点 63 处,占比约 28.9%在 218 处疑似隐患点中,经技术人员现场核查 191 处,查出属地质灾害隐患点 17 处,新增隐患点 6 处。

表 1 2025 年贵州省 InSAR 地质灾害隐患识别数据统计表

指标	数量(处)	占比
InSAR 下发疑似隐患点总数	218	100%
其中:形变量<10cm	155	71.1%
形变量≥10cm	63	28.9%
现场核查点总数	191	—
核查确认地质灾害隐患点	17	8.9%
新增隐患点	6	—

数据来源:贵州省自然资源厅“提升地质灾害监测预警科技能力”工作信息简报(2025年6月)

上述数据反映出 INSAR 能够识别出较多隐患,一是形变量≥10cm 点位确认隐患比例更大;二是核查确认 17 处隐患包含 6 处新增隐患,InSAR 具有更新隐患库的能力;三是仍有大量形变点为非真实隐患,需结合地质资料和光学影像、LIDAR 等综合研判,确认 17 处隐患中滑坡 14 处、崩塌 3 处,符合贵州灾害特征;6 处新增隐患均为高位隐蔽型滑坡,传统调查无法发现,这是 InSAR 优势。精细化研究证实了 InSAR 的准确性。贵州某复杂植被山区 aIOS-2、Sentinel-1 反演形变速率范围分别为-125.34~46mm/A、-159.45~124.44mm/a,共识别 48 处新增滑坡。兴仁市潘家庄镇、青山镇监测到降雨集中期形变加速,2024 年 6—8 月,某典型滑坡点月均形变速率从 2.3mm/

参考文献:

- [1] 李小娟.地理信息系统在矿山地质灾害监测预警中的应用研究[J].世界有色金属,2024,(05):25-27.
- [2] 董昊锦.测绘技术在地质灾害隐患防治中的应用研究[J].工程与建设,2023,37(05):1428-1430.
- [3] 委民正.福建地质灾害监测预警专项平台设计与实现[J].福建地质,2023,42(03):211-216.
- [4] 钟秀燕,蔡有兄,陈艳,等.论测绘地理信息技术在地质勘查中的应用发展[J].有色金属设计,2022,49(01):85-86+89.
- [5] 张永术.地理信息系统在地质灾害应急管理中的应用[J].福建地质,2021,40(04):337-343.

月升至 8.7mm/月,加速 278%。这表明 InSAR 不仅能识别出隐患的空间分布,还能识别出形变与降雨的响应关系。

3.2 案例启示

贵州省的 InSAR 监测验证了测绘与地理信息技术在地质灾害监测预警中的重要性。第一,InSAR 解决了传统地面调查面对大范围、隐蔽性强、动态变化大的地质灾害隐患识别存在“视野盲区”的问题,可以实现“被动发现”(灾后调查)到“主动筛查”(灾前识别)的革命性进步。第二,测绘与地理信息技术提供的空间基准和形变信息为后续的精细调查、监测点位设置和预警阈值设置奠定基础,INSAR 在认定的 17 处隐患点后续布设 GNSS 监测站和裂缝计实现了从“识别”到“监测”再到“预警”的全覆盖。第三,也验证了任何一个单一技术都存在局限性,即 INSAR 认定的形变点需要现场核查确认,形变信息需要结合地质、水文、降雨等多源数据进行研判。这也就是测绘与地理信息技术协同优势:不同空间数据获取方法在一个 GIS 平台下,可以合并研判,互补互证。贵州省的经验也表明,InSAR 技术结合 GIS 分析、地面核查将使地质灾害隐患识别效率提高 5-8 倍,减少漏报率。

4 结语

总而言之,测绘与地理信息重要原因在于地质灾害本身空间属性与演变规律(地质灾害分布有空间规律、成灾发生在地表形变、触发条件与地理环境相关),从而具有空间信息的重要作用。目前测绘与地理信息形成“天—空—地”完整监测链条:卫星遥感(InSAR)实现毫米级广域形变探测;无人机与 LIDAR 填补复杂地形精细调查缺失,穿透植被呈现真实地表;GNSS/北斗为关键点位提供毫米级实时定位;GIS 将多源空间数据有机结合,支持从易发性评价到危险性区划再到动态预警的全流程决策。未来的方向有三:一是多源数据融合深度化(InSAR、无人机影像、GNSS、地面传感数据)将地质、水文、气象等专题数据融合;二是智能化水平提升(利用深度学习实现滑坡自动识别、形变趋势预测、预警阈值动态优化)、监测预警体系业务化(把技术变成可复制、可推广的业务系统)。