



基于 LT-1 卫星的山地丘陵地质灾害隐患识别

——以江西省萍乡市为例

赖晨曦¹, 刘文军^{1*}, 叶群¹, 郭兆成², 万芳琦¹, 易明华¹, 蒋方品³

(1. 江西省自然资源测绘与监测院, 江西 南昌 330002; 2. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 3. 江西省核工业地质调查院, 江西 南昌 330038)

摘要: LT-1 卫星作为我国第一组民用干涉卫星, 为地质灾害隐患综合遥感常态化监测识别提供了可靠的数据支撑。为验证 LT-1 卫星在江西植被高覆盖区的丘陵山区形变监测效果, 采用 Stacking 技术和光学遥感解译相结合的综合遥感识别方法, 对江西省萍乡地区开展地质灾害隐患识别, 共识别出疑似隐患点 195 处, 经野外核查确认隐患点 46 处。研究表明: 条带模式二下的 LT-1 卫星数据对地面塌陷、崩塌、地面沉降隐患识别效果较好; 可识别植被茂密地区的小型滑坡隐患, 对中型及以上滑坡隐患识别具有较好的适用性。

关键词: LT-1 卫星; 地质灾害隐患; 综合遥感识别; 江西省萍乡市

中图分类号: P237

文献标识码: A

doi: 10.12128/j.issn.1672-6979.2025.09.007

0 引言

地质灾害是在自然地质作用和人类活动等因素形成的灾害性地质事件, 具有突发性、多发性、群发性和链生性等特点, 一般可分为崩塌、滑坡、泥石流、地面沉降、地裂缝和地面塌陷等^[1]。江西省地处东南山地丘陵区, 地质灾害类型以滑坡、崩塌为主; 尤其是农村切坡建房引发的地质灾害频发, 严重威胁着人民生命和财产安全^[2]。据统计, 全世界仅有不到 1% 的区域有滑坡库, 而且发生滑坡地质灾害的 80% 不在库^[3]。因此, 做到地质灾害隐患的早期识别, 对实现地质灾害灾前预警预报意义重大。

合成孔径雷达干涉测量技术 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 作为卫星遥感应用的新兴技术, 已成为当前地质灾害隐患识别的重要手段^[4]。诸多学者基于 Sentinel-1 卫星数据, 采用 InSAR 技术开展了地质灾害隐患识别研究^[5-9], 研究结果均表明隐患识别方法的可行性; 林明明

等^[10]采用 ALOS-2 和 Sentinel-1 等数据, 验证了基于时序 InSAR 技术对新疆叶城西合休乡滑坡隐患识别的有效性; 韩静等^[11]以安康地区为研究区域, 验证了 LT-1 卫星在高植被覆盖区滑坡隐患识别的有效性。已有研究成果的研究区域大多数位于植被稀疏、中大型地质灾害为主的西北和西南地区, 对植被覆盖度高、地质灾害频发的东南山地丘陵区关注较少。

萍乡市地处我国东南山地丘陵区域, 受植被覆盖度、地形地貌等因素影响, 地质灾害隐患识别难度较大。而 LT-1 卫星是我国以干涉为核心任务的 L 波段全极化民用 SAR 卫星星座, 主要用于地表形变监测, 为地质灾害隐患常态化识别提供了可靠的数据保障^[12]。基于此, 本文为验证 LT-1 卫星在东南丘陵山地区域地质灾害隐患识别的适用性, 选取萍乡市作为研究区域, 基于多时相 LT-1 卫星数据和光学遥感影像, 利用 InSAR 技术获取地表形变信息, 采用综合遥感识别技术, 解译出地质灾害疑似隐

收稿日期: 2025-02-07; **修订日期:** 2025-03-26; **编辑:** 陶卫卫

基金项目: 江西省重点研发计划项目, “天-空-地”联合观测的公路边坡地质灾害智能识别与监测预警关键技术研究 (编号: 20243BBI91033); 自然资源部 2023 年度部省合作试点项目, 江西省地质灾害隐患综合遥感识别应用关键技术研究 (编号: 2023ZRBSHZ058); 江西省自然资源厅科技创新项目, 水稻高光谱反演关键技术研究 (编号: ZRKJ20242508)

作者简介: 赖晨曦 (1994—), 男, 江西宜春人, 工程师, 主要从事自然资源要素遥感监测与应用研究; E-mail: laicxjxcja@126.com

*** 通信作者:** 刘文军 (1988—), 男, 江西吉安人, 工程师, 主要从事地质灾害隐患综合遥感识别研究; E-mail: 1553379101@qq.com

患点并开展野外验证,最后选取典型地质灾害隐患点进行分析,以期为江西省山地丘陵地质灾害隐患识别提供新思路。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

萍乡市位于江西省西部,地形地貌主要包括中低山、丘陵、岗地和河谷平原四类,其中低山和丘陵区分布最为广泛。研究区属亚热带湿润季风气候区,多年年平均降水量 1 596.7 mm,降水主要集中在 4~6 月,占全年降水量的 42%。研究区地质灾害类型主要包括滑坡、地面塌陷、地面沉降和崩塌等;其中地面塌陷和地面沉降主要位于采煤区和岩溶区,受历史采煤、地下水开采的影响而引起^[13](图 1)。

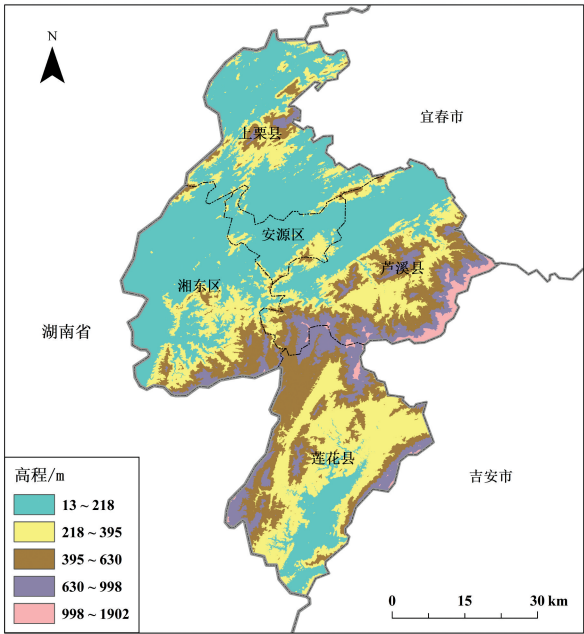


图 1 研究区高程示意图
(DEM 来源于地理空间数据云)

1.2 数据源及其预处理

(1)LT-1 卫星。数据采用双星跟飞、条带模式 2 下拍摄的 6 景升轨数据,时相分别为 20230423、20230521、20230529、20230606、20230610、20230614,空间分辨率为 12 m。为有效去除因轨道误差引起的系统性误差,提高数据质量,本文利用精密轨道数据进行轨道信息修正等预处理。该数据用于形变异常监测。

(2)GF-2 卫星。数据时相为 2023 年 1—6 月,全色、多光谱影像空间分辨率分别为 0.8 m、3.2 m。首先采用已有卫星影像数据作为参考影像,分别对全色和多光谱影像进行校正,保证两者影像融合空间一致性;采用 PanSharpening 方法进行全色与多光谱的影像融合,提高影像空间分辨率,该数据主要用于辅助地质灾害隐患识别。

2 研究方法

2.1 地表形变监测技术

Stacking 技术作为一种简单而有效的时序 InSAR 处理方法,其实质是基于地面形变呈现线性变化的假设,通过干涉对叠加评价处理抑制大气延迟,以实现区域高精度测量。具体而言,Stacking 技术通过生成的多景差分干涉解缠估算线性相位速率,实际是基于最小二乘法对 N 组观测线性回归的过程^[14-15],其公式(1)为:

$$Ph_rate = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta t_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^N \Delta t_i^2} \tag{1}$$

式中: Ph_rate 为线性相位速率; Δt_i 为干涉对时间基线; φ_i 为单个干涉对解缠相位; N 为参与形变解算的干涉对数量。

2.2 地质灾害隐患识别技术

首先基于 InSAR 形变特征,找到形变聚集明显的区域;其次结合光学影像,将非人类活动导致形变异常的区域和有威胁对象(如房屋等)的区域圈定为疑似隐患范围;最后对疑似隐患范围进行野外验证,分析地质条件及周边情况,综合确认是否为地质灾害隐患点^[4]。

3 结果分析

3.1 地质灾害隐患整体情况

基于 LT-1 卫星数据,进行 Stacking 处理结果如图 2 所示,LOS 向形变速率结果整体效果较好,但地形起伏较大的地区失相干相对较为严重。监测结果表明,研究时段内,LOS 向平均形变速率 11 mm/a,靠近 LOS 向最大形变速率可达 192 mm/a,远离 LOS 向最大形变速率可达 213 mm/a。从整体监测效果来看,城市等平坦地区适用性优于山区,主要原因在于山区植被覆盖度高,

地形起伏较大,SAR 影像在成像过程中受透视收缩、叠掩和阴影等几何畸变引起,导致部分山区形变监测效果不佳。

结合地表形变数据和高分辨率光学遥感影像,经综合遥感目视解译,结果如表 1 所示。研究区范围内共识别 195 处疑似隐患点,其中地质灾害类型以滑坡为主,有 156 处,占比达 80%;此外,识别 15 处地面塌陷,13 处地面沉降,11 处崩塌。从空间分布来看,主要分布于上栗县和湘东区,分别识别疑似隐患点为 97 处和 51 处。最终经野外核查确认隐患点 46 处,其中滑坡 27 处,地面塌陷 7 处,地面沉降 4 处,崩塌 8 处。

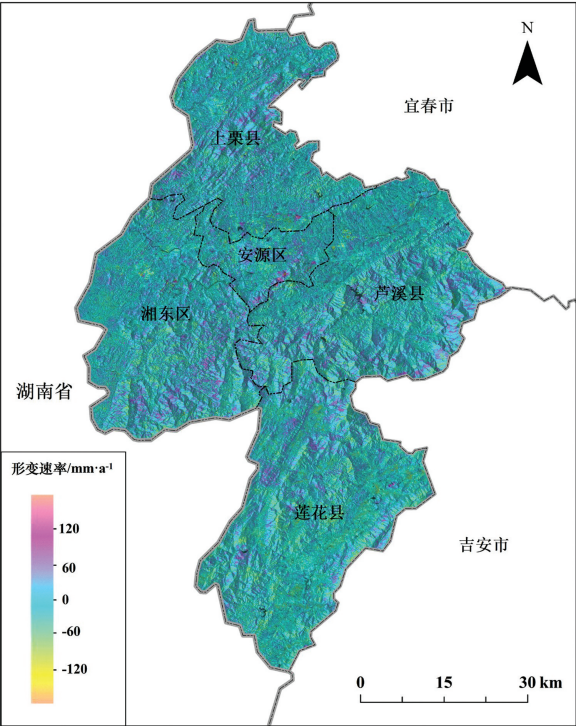


图 2 研究区形变速率图

3.2 典型地质灾害隐患

对萍乡地区识别的 46 处地质灾害隐患点,根据其形变异常聚集、形成条件明显、威胁对象等特点,选取 PX_001 滑坡隐患、PX_002 地面沉降 2 种地质灾害类型进行典型分析,探讨 LT-1 卫星在隐患识别方面的应用成效。

3.2.1 PX_001 滑坡隐患点

PX_001 滑坡隐患点属于中型滑坡,形变区范围较大,滑坡区相对高差约 101 m,自然坡度 15°~30°,地势东南高西北低,斜坡整体呈上陡下缓;山坡

植被发育,主要为毛竹,斜坡上部植被覆盖率 90% 以上,中部居民房屋零散分布(图 3(b))。基于 Stacking 技术探测结果表明(图 3(a)),形变特征明显异常,斜坡整体处于较不稳定状态,LOS 向最大形变速率达 51 mm/a,累计形变量 40 mm。该滑坡隐患呈现斜坡整体性形变,但形变集聚区域主要分布在隐患后缘及中部,前缘形变不明显。通过实地调查发现该点为在库隐患点,滑坡始发时间为 2019 年 7 月 29 日,雨季有零星崩滑。2021 年 3 月 19 日对滑坡隐患区开展监测预警工作,从预警监测设备获取到 2023 年 3 月 30 日至 2023 年 6 月 18 日期间裂缝计监测数据显示,隐患区累计位移 49.3 mm,与本文形变位移量 40 mm 较为吻合。

表 1 萍乡市地质灾害隐患识别一览表

县(市、区)	隐患类型	疑似隐患点数量	确认隐患点
安源区	滑坡	5	1
	崩塌	1	0
	地面塌陷	3	2
	地面沉降	2	2
湘东区	滑坡	42	10
	崩塌	3	3
	地面塌陷	4	0
	地面沉降	2	2
芦溪县	滑坡	9	2
	崩塌	1	1
	地面塌陷	3	2
	地面沉降	2	0
上栗县	滑坡	80	12
	崩塌	6	4
	地面塌陷	4	3
	地面沉降	7	0
莲花县	滑坡	20	2
	崩塌	—	—
	地面塌陷	1	0
	地面沉降	—	—

注:“—”表示未识别出相应隐患类型。

野外实地核查表明(图 4),滑坡平面整体呈不规则形状,滑坡体前缘位于坡脚公路处路堤,后缘边界以张拉裂缝为界,边缘以剪切裂缝为界,滑坡体目前未剪出,变形迹象明显,坡面形态呈阶状,滑带呈折线形,剪出方位为 309°;滑坡体主要组成为粉质黏土,平均厚约 6 m,滑坡体约 16.65 万 m³,为一处中型推移式滑坡隐患体。滑坡体坡面见间断季节性地表径流流经,岩土较潮湿,坡面发育有拉张及剪切裂缝,具有一定贯通性,其上建筑物及道路有较明显的变形迹象。后缘数条裂缝发育,后缘壁上较为明显变形迹象,滑坡活动等级高,发展趋势不稳定。在

连续强降雨天气诱发因素下可能发生滑坡地质灾害,滑体一旦整体剪出,直接冲毁受威胁房屋及公路(水泥混凝土路面),承灾体易损性高,威胁滑坡前后缘及坡体上 3 户 6 栋 7 人,风险程度中等。该隐患点已安装 GNSS 监测站、裂缝计、雨量计等多种监测预警设备,并组织人员开展巡查。

3.2.2 PX_002 地面沉降隐患点

PX_002 地面沉降隐患点地处矿区范围,斜坡

地势西北高东南低,自然斜坡高 25 m,坡度约 18°;山体浑圆,植被发育,主要为灌木,覆盖率 70% 以上(图 5(b))。基于 Stacking 技术探测结果表明(图 5(a)),形变特征明显异常,且主要集中在居民聚集区,该区域 LOS 向最大沉降速率为 30 mm/a,年均沉降量 25 mm/a,累计变形量 106 mm。与已有研究结果相比^[16],形变速率有所降低,表明该地区存在地面沉降,但逐渐趋于稳定态势。

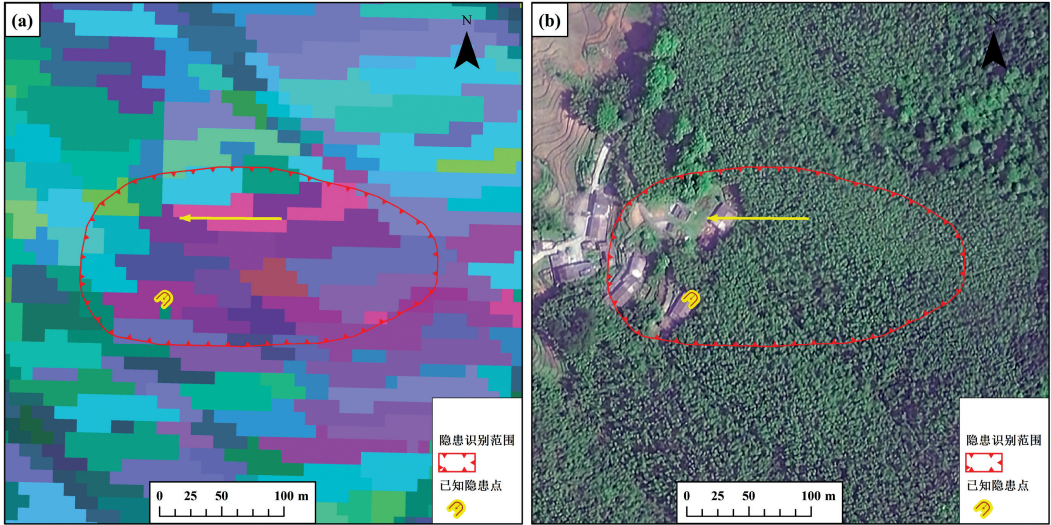


图 3 PX_001 滑坡隐患点地表形变速率(a)和光学影像解译(b)



图 4 PX_001 滑坡隐患点形变迹象

该地面沉降由矿山开采引发,沉降类型为采空沉降。由于矿区是多煤层开采,即煤层从浅部开采到深部,从上一层开采到下一层,造成老采区频繁活化,致使附近自 20 世纪 70 年代以来居民房屋陆续出现房屋墙体、院墙开裂等情况(图 6)。沉降区第四系覆盖层为粉质黏土、砂砾石层,双层结构,厚 5~18 m,空间变化规律由沉降中心(采空区)向周边方向逐渐减小,主要沉降层位为三叠纪安源组含煤

层,沉降区面积约 0.2 km²,规模为小型。根据历史资料记载,调查区累计沉降量约 4 500 mm;研究人员通过实地调查走访发现,近年来墙体开裂等现象逐渐减少,这与地面沉降速率变化趋势较为一致。

在关闭的矿井采矿区,原形成的沉降区域逐渐趋于稳定。在报废矿井中尚有残余煤,若未来继续大量开采,则已稳定的沉降区存在继续沉降或塌陷的风险。目前该沉降区威胁影响居民 33 户 40 人,

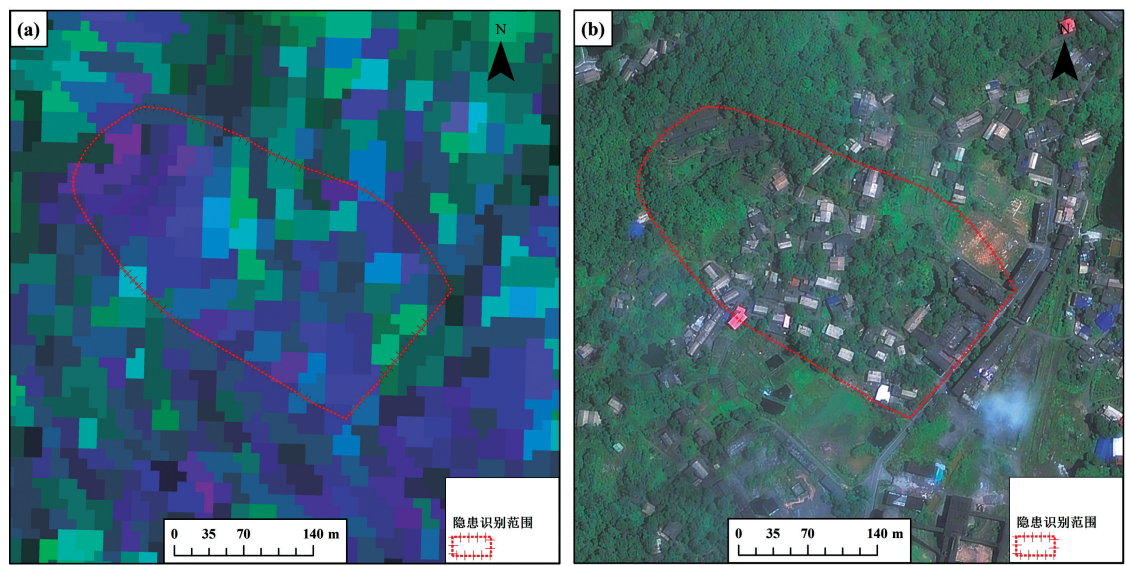


图 5 PX_002 地面沉降隐患点地表形变速率(a)和光学影像解译(b)



图 6 PX_002 地面沉降隐患点形变迹象

但尚未造成直接经济损失。此外,该区域已开展常态化监测,发生灾害可能性低。

4 结论与讨论

(1)本文基于 2023 年 4 月 26 日至 2023 年 6 月 24 日期间的 6 期 LT-1 卫星数据,采用 Stacking 技术,共识别出疑似隐患点 195 处,主要分布于上栗县和湘东区;经野外核查确认隐患点 46 处,其中滑坡、崩塌、地面塌陷、地面沉降隐患点分别为 27 处、8 处、7 处、4 处;PX_001 中型滑坡隐患点监测的滑坡形变量与 GNSS 监测数据较为一致。研究结果表明:条带模式二下的 LT-1 卫星数据对地面塌陷、崩塌、地面沉降隐患识别效果较好;对植被茂密地区

的小型滑坡隐患识别取得了一定成效,但效果不显著;对植被茂密地区的中型及以上滑坡隐患识别具有较好的适用性。

(2)本文受到数据源的限制,仅选用 6 期空间分辨率为 12 m 的 LT-1 卫星升轨数据开展研究区的形变监测,受系统和非系统性误差较大,不能精细化的监测到切坡建房引起的小型滑坡。下一步将主要从以下三方面开展深入研究:一是数据层面,受到 LT-1 卫星拍摄模式的调整,空间分辨率提高至 3 m,将进一步提升小型滑坡的监测精度;二是技术层面,是随着 LT-1 卫星数据的不断积累,结合升降轨数据可以有效避免部分山区的失相干扰情况,采用 PS-InSAR、SBAS-InSAR 等时序 InSAR 监测技术,掌握地表形变变化趋势;三是辅助数据层面,可以借助实景三维数据和机载 Lidar,有助于提高识别准确率,为江西地区切坡建房引发的地质灾害精细化监测提供强有力的支撑。

参考文献:

[1] 张勤,赵超英,陈雪蓉.多源遥感地质灾害早期识别技术进展与发展趋势[J].测绘学报,2022,51(6):885-896.

[2] 刘玉伟,余广文,甘建军,等.江西省居民切坡建房引发的地质灾害特征及防治对策[J].现代矿业,2023,39(10):211-214.

[3] BRABBE E. The word landslide problem[J]. Episodes,1991,14(1):52-61.

[4] 葛大庆,戴可人,郭兆成,等.重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):949-956.

[5] 李晶,朱武,张关龙,等.基于 InSAR 和热点分析技术的黄土高原地质灾害隐患识别[J].工程地质学报,2023(9):1-17.

[6] 蔡建澳,明冬萍,赵文祎,等.基于综合遥感的察隅县滑坡隐患识别及致灾机理分析[J].自然资源遥感,2024,36(1):128-136.

[7] 曾斌,刘诗雅,董琦,等.联合 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 的鄂西山区滑坡隐患识别:以长阳县清江流域为例[J].安全与环境工程,2024,31(2):202-212.

[8] 刘晓杰,赵超英,李滨,等.基于 InSAR 技术的甘肃积石山震区活动滑坡识别与动态形变监测[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(2):297-312.

[9] 苏晓军,张毅,孟兴民,等.中巴经济走廊洪扎段潜在滑坡 SBAS-InSAR 早期识别及发育特征分析[J].遥感学报,2024,28(4):885-899.

[10] 林明明,赵勇,王坤,等.基于多源时序 InSAR 技术的滑坡隐患早期识别[J].西北地质,2024,57(6):268-277.

[11] 韩静,杨帅,杨涛,等.基于 L 波段差分干涉 SAR 卫星的安康地区滑坡隐患识别[J].自然资源遥感,2024,36(4):254-259.

[12] 李涛,唐新明,李世金,等.L 波段差分干涉 SAR 卫星基础形变产品分类[J].测绘学报,2023,52(5):769-779.

[13] 刘玉伟,甘建军,余广文,等.江西省地质灾害分布特征及诱发因素分析[J].四川地质学报,2023,43(4):708-712.

[14] SANDWELL D T,PRICE E. Phase gradient approach to stacking interferograms[J]. Journal of Geophysical Research, 1998,103(B12):30183-30204.

[15] 吴明轶,罗明,刘岁海.基于光学遥感与 InSAR 技术的潜在滑坡与老滑坡综合识别:以滇西北地区为例[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(3):84-93.

[16] 侯靖钥.基于多时相 InSAR 技术的萍乡矿区地表形变监测与分析[D].抚顺:东华理工大学,2023.

Identification of Geological Hazards in Mountainous
Hills Based on LT-1 Satellite

——Taking Pingxiang City in Jiangxi Province as an Example

LAI Chenxi¹, LIU Wenjun¹, YE Qun¹, GUO Zhaocheng², WAN Fangqi¹, YI Minghua¹, JIANG Fangpin³

(1. Jiangxi Institue of Natural Resources Mapping and Monitoring, Jiangxi Nanchang 330002, China; 2. China Area Geophysical and Remote Center of Natural Resources, Beijing 100083, China; 3. Jiangxi Nuclear Industry Geological Survey, Jiangxi Nanchang 330038, China)

Abstract: As the first group of civilian interference satellites in China, LT-1 satellite has provided reliable data support for normalized monitoring and identification of geological hazards through comprehensive remote sensing. In order to verify the deformation monitoring effect of LT-1 satellite in the hilly and mountainous areas with dense vegetation coverage in Jiangxi province, a comprehensive remote sensing identification method combining Stacking technology and optical remote sensing interpretation has been used to identify geological hazards in Pingxiang area in Jiangxi Province. A total of 195 suspected hidden danger points have been identified, and 46 hidden danger points have been confirmed through field verification. It is indicated that LT-1 satellite data in Band Mode 2 performs well in identifying hidden dangers, such as ground subsidence, collapse and subsidence. It can identify small landslide hazards in densely vegetated areas and has good applicability for identifying medium and above landslide hazards.

Key words: LT-1 satellite; potential geological hazards; integrated remote sensing identification; Pingxiang city in Jiangxi province