



移动阅读

熊小辉, 白永健, 铁永波, 等, 2024. 基于“天-空-地-深”方法的山区城镇地质灾害隐患判识: 以四川省喜德县重点乡镇为例[J]. 沉积与特提斯地质, 44(3): 560–571. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.09001](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.09001)

XIONG X H, BAI Y J, TIE Y B, et al., 2024. Identification of potential geohazards in mountainous towns based on "Space-Air-Ground-Underground" approach: A case study of key towns in Xide County, Sichuan Province[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(3): 560–571. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.09001](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.09001)

基于“天-空-地-深”方法的山区城镇地质灾害隐患判识： 以四川省喜德县重点乡镇为例

熊小辉^{1,2,3,4}, 白永健^{1,2,3}, 铁永波^{1,2,3}, 高延超^{1,2,3}, 徐 伟^{1,2,3}, 龚凌枫^{1,2,3}, 王家柱^{1,2,3},
田 凯^{1,2,3}, 李鹏岳^{1,2,3}

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 610218; 2. 自然资源部地质灾害
风险防控工程技术创新中心, 四川 成都 611734; 3. 自然资源部成都地质灾害野外科学观测研究站, 四川 成都
610000; 4. 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 四川 成都 610218)

摘要: 为了更好地适应山区城镇地质灾害隐患精细识别的需求, 实现中、小型以及高隐蔽性地灾隐患的有效判识, 本次以川西南喜德县重点乡镇为例, 综合采用了光学遥感、InSAR、无人机载 LiDAR、地面精细调查、高密度电法等方法, 从不同精度和角度对研究区系统开展了地质灾害隐患判识。结果表明, 不同手段具有很好的互补性, 综合识别效果较好, 共识别地灾隐患 80 处, 包括新增识别 29 处, 此外, 识别潜在危险源 131 处; 孕灾条件差异制约着不同识别方法的有效性, 其中光学遥感在研究区西北部构造变形强烈、坚硬岩组分布区具有更好的识别效果, 无人机摄影测量配合地面斜坡详查及物探探查等手段更适合东部米市宽缓向斜红层分布区的地灾识别, 机载 LiDAR 高清三维摄影对重点城镇后山斜坡普遍发育的“簸箕形”平面形态滑坡和“栎叶状”流域平面形态泥石流识别效果较好; 易崩易滑工程地质岩组与顺向型斜坡结构的优势组合是研究区地灾孕育的关键, 而深部物探对控灾结构面探查是地质灾害隐患判识的重要佐证。

关键词: 遥感解译; 地面调查; 地球物理探测; 地质灾害隐患识别; 山区城镇

中图分类号: P694

文献标识码: A

Identification of potential geohazards in mountainous towns based on "Space-Air-Ground-Underground" approach: A case study of key towns in Xide County, Sichuan Province

XIONG Xiaohui^{1,2,3,4}, BAI Yongjian^{1,2,3}, TIE Yongbo^{1,2,3}, GAO Yanchao^{1,2,3}, XU Wei^{1,2,3}, GONG Lingfeng^{1,2,3},
WANG Jiazhu^{1,2,3}, TIAN Kai^{1,2,3}, LI Pengyue^{1,2,3}

(1. Chengdu Center of China Geological Survey(Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, China; 2. Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazard, Ministry of Natural Resources, Chengdu 611734, China; 3. Observation and Research Station of Chengdu Geological Hazards, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610000, China; 4. Key Laboratory of Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610218, China)

收稿日期: 2024-05-22; 改回日期: 2024-08-14; 责任编辑: 周小琳; 科学编辑: 白永健

作者简介: 熊小辉(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事基础地质与地质灾害方面的调查研究工作。E-mail: xiongxiaohui1987@163.com

资助项目: 云南省重点研发计划项目(202403AA08000); 中国地质调查局项目(DD20230435, DD20230541)

Abstract: In order to better meet the needs of geohazard identification in mountainous towns and effectively detect small-sized, medium-sized, and hidden geohazards, a case study was conducted in several typical towns in Xide County, southwest Sichuan. The study employed a comprehensive suite of techniques, including optical remote sensing, InSAR, LiDAR, detailed slope investigation, and high-density resistivity methods, to identify geohazards from various perspectives and levels of precision. The results show that these methods complement each other well and are effective in geohazard identification. A total of 80 occurrences of geohazards were identified, including 29 new identifications, along with 131 potential geohazard dangers. The differences in disaster-inducing factors in the study area constrain the effectiveness of different methods. Optical remote sensing proved more effective in areas characterized by strong structural deformation and hard rock formations. In contrast, unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry, combined with detailed ground surveys and geophysical exploration, was more suitable for identifying geohazards in the red layer distribution areas of the Mishi wide gentle syncline. Airborne LiDAR high-definition 3D photography was particularly effective for identifying "dustpan-shaped" landslides and "oak leaf-shaped" debris flows, which are common on the slopes of key towns. The combination of easily collapsible and slidable engineering geological rock groups and dip-slope structures is the key to the formation of geohazards in the study area. Geophysical exploration targeting disaster-controlling structures is an important support for geohazard identification.

Key words: remote sensing interpretation; ground survey; geophysical exploration; geohazard identification; mountainous towns

0 引言

随着区域地质灾害调查评价的不断深入,调查精度要求不断提高,高隐蔽性、高危害性地质灾害隐患识别和防治是目前地质灾害工作的重点,尤其是重要城镇及周缘人口密集区中小型隐蔽性地质灾害更是防范难点(葛大庆等, 2019; 许强, 2020; 许强等, 2022)。近年来,随着遥感技术的兴起,结合地质灾害孕灾机理分析与斜坡深部结构探测,基于“天-空-地-深”的综合地灾隐患精细识别将成为未来城镇级及更大精度地质灾害调查的发展趋势(Scaioni et al., 2014; Nicola et al., 2017; 黄海峰等, 2022; 吴明堂等, 2023; 许强等, 2023)。天基高分辨率光学卫星遥感解译具有覆盖范围广、宏观性强、信息丰富等特点,适合圈定区域大尺度变形,而合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)是对前者的重要补充,具有全天候、全天时、大范围连续跟踪微小形变的能力,可观测到地表毫米级的缓慢变形(Francesca et al., 2011; 刘星洪等, 2020; 卓冠晨等, 2022; 赵超英, 2022); 空基无人机载 LiDAR 测量可穿透植被,有效获取高清地表真实地形形变特征,实现更大精度的地质灾害识别(谭德军和尹晨洋, 2020; 贾虎军等, 2021; 党杰等, 2022); 无人机摄影测量配合下的地面核查是对前述地质灾害综合遥感识别的进一步复核; 深部地球物理探测对现有及潜在地质灾害识

别和评估具有重要意义(蒋全科等, 2023)。“天-空-地-深”一体化地灾识别方法是对地质灾害“三查”体系的有效整合与深化,立体式、全方位融合了地灾隐患的综合遥感调查、地面斜坡详查及深部探查,是山区城镇地质灾害及潜在隐患识别的重要实践指导。

为进一步探索“天-空-地-深”一体化方法在山区城镇地灾隐患识别中的有效应用,尤其针对高危害中小型隐蔽性地质灾害及隐患,实现山区城镇地质灾害高效识别。本文综合运用光学遥感、InSAR、机载 LiDAR、无人机摄影测量、地面调查及高密度电法物探测量等方法,对川西南喜德县光明镇及沿孙水河河谷的冕山镇、两河口镇、米市镇、且拖乡等重点乡镇,开展了多手段、不同尺度的地质灾害隐患精细识别,通过立体式、全方位的地灾筛查助力山区城镇经济社会发展。

1 研究区概况

1.1 自然地理与地质环境条件

研究区位于川西南喜德县北部孙水河流域,包括光明镇、冕山镇、两河口镇、米市镇和且拖乡等5个乡镇(图1),是喜德县县城所在地、重要城镇综合规划发展区和经济产业廊道,区内分布成昆铁路及成昆铁路复线工程,人口较为集中。孙水河自南东往北西流经研究区,流域两岸主要为中低山—中山地貌,沟谷切割较深。区内海拔介于1720~

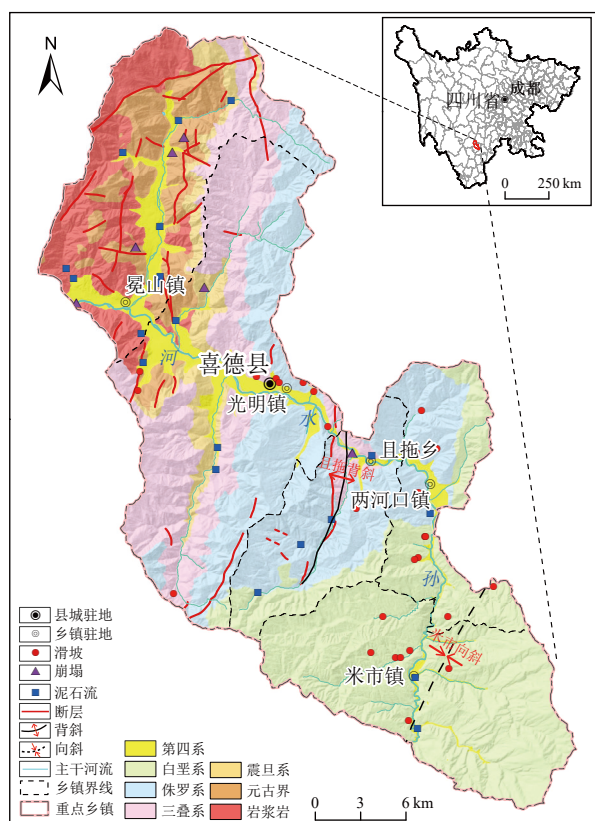


图1 研究区区域地质背景及地质灾害分布图

Fig.1 Regional geological setting and distribution of geohazards in the study area

4 500 m, 地势总体北部、南部较高, 中西部低, 最高点位于冕山镇北部。研究区多年平均降雨量 1 006.1 mm, 沿孙水河流域降雨较均匀, 分布呈北多, 东、西南少的差异, 冕山镇年降雨量 1 237.8 mm, 东部米市镇年降雨量 1 072.1 mm, 在时间分布上, 5 月中旬至 10 月中旬的降雨量占了全年降雨量的 88.4%, 具有冬春干旱、夏秋多雨的特点。

研究区地处青藏高原东缘造山带与扬子稳定陆块过渡区, 地质历史上长期以东西向挤压应力为主, 境内主要地质构造线方向近南北向。自西向东, 构造变形减弱趋势显著。西侧以安宁河断裂为界与康滇古陆相邻(王运生等, 1996), 发育大量近南北向断裂与紧闭褶皱, 地层产状高陡, 岩浆岩沿构造裂隙带大量分布; 东部断裂稀少, 褶皱平缓, 主要发育宽缓开阔的向斜, 构造活动较弱(覃建雄等, 2001)。研究区主要受西侧安宁河断裂带地震活动影响, 震源中心多位于区外西昌至冕宁之间, 地震动峰值加速度为 0.2 g。区内出露地层以元古界和中新生界为主(图 1), 其中西部冕山镇一带主要发

育中新元古界变质岩及岩浆岩, 变质变形均较强烈, 主要为坚硬花岗岩、较坚硬碳酸盐岩等工程地质岩组, 属典型易崩地层; 中部且拖背斜核部晚三叠世至早侏罗世发育白果湾组碳质泥岩, 为一套软岩组, 可为泥石流提供大量松散物源; 往东南, 地层时代逐渐变新, 主要发育侏罗纪、白垩纪红层, 岩性较软至较硬, 为软硬互层砂岩泥岩工程地质岩组, 属典型易滑地层; 孙水河及其支流河谷区多发育阶地相松散岩组, 发育小型河岸崩塌。

1.2 地质灾害发育概况

研究区地质灾害发育类型主要包括滑坡、崩塌和泥石流, 目前登记在册的地灾点有 51 处, 包括滑坡 27 处、崩塌 6 处、泥石流 18 处(图 1), 灾害规模以中、小型为主。受工程地质岩组、地质构造、区域地形地貌等孕灾地质条件制约, 尤其是近东西向地层岩性、工程地质岩组特征及构造变形强度的不同, 研究区各重点乡镇地质灾害发育分布特征差异明显, 包括灾害点类型、数量等, 其中, 光明镇主要发育滑坡, 其次为泥石流和崩塌; 两河口镇主要发育滑坡, 发育已登记在册的泥石流 1 处, 不发育崩塌; 米市镇主要发育滑坡, 其次为泥石流; 冕山镇是主要的崩塌发育区, 泥石流也是区内较为发育的地质灾害类型; 且拖乡发育 4 条泥石流沟, 滑坡、崩塌发育较少, 均为 1 处。整体显示研究区西部冕山镇、光明镇一带断裂构造丰富、坚硬岩组较发育地区的地质灾害类型以崩塌、泥石流为主; 东部地区的米市镇、两河口镇等红层砂泥岩软硬互层分布区受米市宽缓向斜构造控制显著, 沿孙水河河谷两侧多发育滑坡地质灾害。

2 “天-空-地-深”一体化地灾隐患识别方法

地质灾害的孕育、发生与演化是内外动力地质综合作用的表现, 其既表现为地表变形破坏, 也受内部物质结构的控制, 因此, 地质灾害隐患的识别应从“天-空-地-深”多角度立体化综合开展(图 2)。

首先, 前期应对研究区自然地理和区域地质环境条件开展资料收集, 查明区内地质灾害发生的孕灾地质背景及主控因素, 如工程地质岩组特征、地质构造特征、地形地貌特征等, 这是后期有效开展地灾隐患识别的基础。在此之后, 基于“光学遥感解译+InSAR 形变分析+无人机摄影测量(机载 LiDAR)”的综合遥感解译是对研究区地质灾害隐

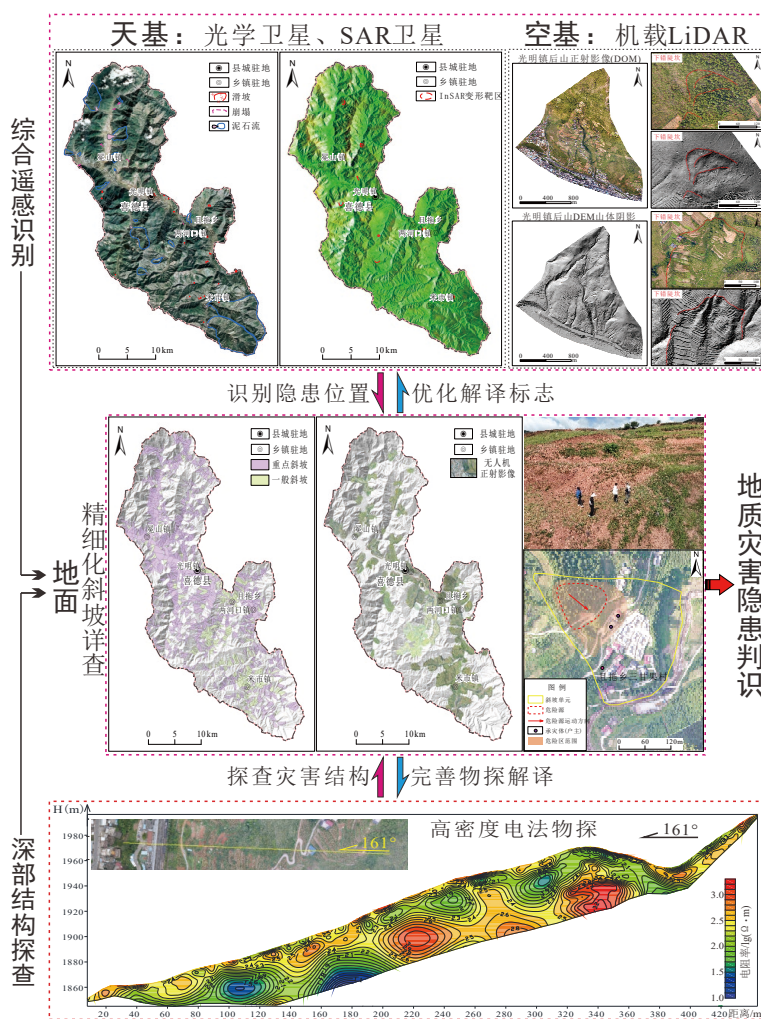


图2 “天-空-地-深”地灾隐患判识方法及主要流程

Fig. 2 Methodology and process for "Space-Air-Ground-Underground" geohazards identification

患的第一次全方位识别,光学遥感主要根据地表变形破坏特征,通过建立不同灾害类型遥感解译标志,对地质灾害隐患进行圈画;通过 InSAR 监测可以识别宏观特征不明显的微小变形范围及其形变速率;无人机载 LiDAR 针对地表植被覆盖区域具有更高精度和最大程度还原地表变形特征的能力,能有效获取地质灾害微地貌形变特征。从地质灾害发育规律出发,地面调查主要以斜坡单元与沟谷单元为基本调查单元,对地形地貌、地质构造、工程地质岩组、斜坡结构、水文地质条件、人类工程活动、历史变形迹象等孕灾地质条件进行调查并圈画潜在危险源,现场复核遥感解译地质灾害隐患点。针对典型斜坡布设代表性物探剖面,对斜坡内部开展物质结构探查,评估斜坡潜在变形趋势。

综合遥感识别、地面精细化斜坡地灾详查和深部结构探查三者相互配合,彼此互馈。综合遥感

从区域上识别隐患位置,地面详查实现对隐患的核查,物探探查斜坡内部结构,同时地面详查反过来进一步优化综合遥感解译标志和完善物探解译成果。全过程实现了从潜在危险源、不良地质体至地质灾害隐患、地质灾害的最终识别判定,其中潜在危险源指受自然因素或人为活动影响,可能危害人类生命、财产或影响生存环境的潜在不良地质体;不良地质体仅指无承灾对象的灾害现象,与地质灾害相比,不良地质体特征除了无承灾体之外,具备相应灾害体的其余特征;地质灾害隐患通常指通过地形、地质和影响因素调查,具备孕灾地质条件,暂无明显变形迹象,初步推测可能会发生地质灾害的地点或区段。潜在危险源与地质灾害隐患的区别主要基于现有致灾体变形强度及对孕灾因子灾变趋势的主观分析,前者更趋于灾害孕育早期,后者已达到孕灾的中晚期。

2.1 综合遥感地灾解译

(1) 光学遥感解译

光学遥感解译主要利用天基卫星高清光学遥感影像,通过目视解译的方法,识别并圈画各类地质灾害隐患。研究区采用的光学卫星数据为高分二号,其空间分辨率为 0.8 m,卫星影像数据成像时间为 2021 年 3 月,云、雪、雾覆盖率<5%,且没有覆盖重要地物,光学影像数据经过正摄校正后与地形图进行配准。此次光学遥感解译的地质灾害类型主要为滑坡、崩塌和泥石流(图 3),同时,解译出少量不良地质体。各类灾害类型具体解译标志如下:

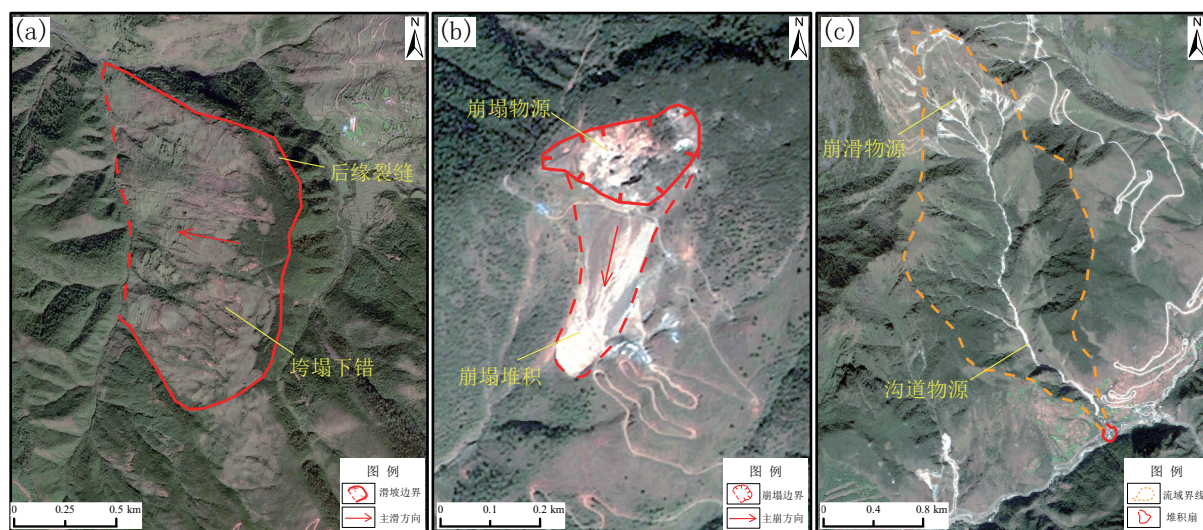
滑坡解译标志: 滑坡体地形破碎,起伏不平,斜坡表面有不均匀陷落的局部平台;斜坡较陡且长,可见明显的新近变形、滑动迹象;滑坡后缘和两侧可见裂缝,特别是土质滑坡,地表裂缝宽度较大,延伸较长;地表湿地、泉水发育,在滑坡前缘及滑坡平台上,呈斑状或点状深色调;滑坡体上无植被分布或植被与其周围有显著区别;滑坡各部分要素诸如滑坡周界、裂缝、下错台坎等影像清晰可见。

崩塌解译标志: 崩塌堆积体多呈下宽上窄三角形,色调以白色、灰白色等浅色调为主;新近崩塌堆积体上通常无植被分布;崩塌体表面具粗糙感,有时可出现巨大块石影像;危岩区一般坡度陡,多在 50°以上,常有明显阴影;危岩区因崩塌,基岩出露新鲜结构面,对光谱具有较强的反射能力,故多呈浅色调。

泥石流解译标志: ①形成区:在卫星影像上,泥石流的形成区一般呈瓢形、栎叶形、桃叶形或斗状圈谷,谷坡上有大量松散固体物源,崩塌、滑坡和岩堆等现象发育,影像纹理粗糙,坡表可见斑状或片状植被破坏区,山坡坡度较陡,谷坡两侧阴影色调反差明显。②流通区:在卫星影像上,流通区常呈瓶颈状或喇叭状,谷坡陡,沟床比降大,有时可见到陡坎或台阶。高分辨率的航空影像上,可以清楚地看到沟道内的巨石,沿沟道呈现零星分布。③堆积区:泥石流的堆积区多位于沟口,纵坡平缓,堆积扇多呈扇形或锥形,刚发生的泥石流这种形状更加明显,如果有多次泥石流活动,还会使堆积扇呈套叠现象;色调上呈浅色调,纹理细腻,河流在此处多弯曲通过。一些老堆积扇上,可见到房屋,小路和开垦农田。

(2) InSAR 形变分析

本次研究区 InSAR 形变监测采用哨兵-1 雷达数据,时间跨度为 2018 年 12 月至 2022 年 1 月,监测周期大于 3 年,地面分辨率为 5 m×20 m。综合采用了 SBAS 和 Stacking 两种处理方法,将升降轨及不同处理方法相结合。研究区 InSAR 地表形变异常区主要存在两种较为典型的识别标志:“环形”和“单一型”,当新滑坡形变量相对较大时,InSAR 形变干涉图多呈现为“煎蛋状”环形形变区,环形 InSAR 形变区由外向内形变量逐渐增大,InSAR 形变区图斑颜色逐渐由环形外圈向中心过渡;当识



a. 瓦库布乃滑坡; b. 草王坪崩塌; c. 九盘营泥石流

图 3 研究区典型滑坡、崩塌、泥石流光学遥感解译

Fig. 3 Optical remote sensing identifications of typical landslides, collapses, and debris in the study area

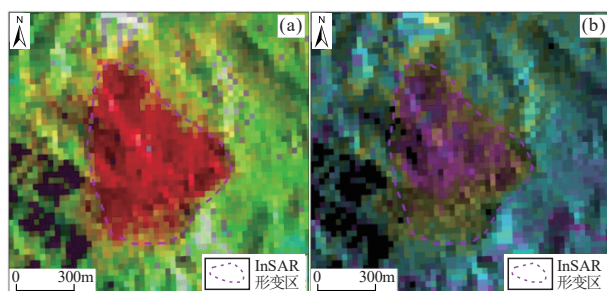
别区形变量相对较小时, InSAR 形变干涉图上形变数据异常导致图斑颜色变化较为单一, 与周边区域颜色差异明显, 如基于 Stacking-InSAR 以及 SBAS-InSAR 的则约乡滑坡形变速率图(图 4), 滑坡体与周边斜坡形变速率存在明显差异, 能够有效圈定滑坡边界范围。

(3) 机载 LiDAR 摄影测量

针对研究区重点城镇后山斜坡开展了激光雷达(LiDAR)观测, 对光明镇县城后山斜坡开展了倾斜摄影测量三维建模。基于机载 LiDAR 数据(Point Cloud、DSM、DEM、DOM)资料, 结合区域地质、气象、水文、地震以及光学遥感、InSAR 等成果资料, 建立滑坡、崩塌、泥石流等遥感解译标志, 对调查区高植被覆盖下的边坡形变特征进行精细辨识, 共识别潜在地质灾害隐患 15 处。

典型滑坡在三维模型上的一般判识特征包括簸箕形(舌形、不规则形等)的平面形态(图 5, 图 6), 发育滑坡壁、滑坡台阶、滑坡舌、滑坡裂缝、滑坡鼓丘等地形。除了局部识别标志外, 还应从宏观的地貌形态进行判识, 如河谷中的缓坡、分水岭地段的阴坡、侵蚀基准面急剧变化段、支沟交会地段及其源头等。在此次的解译中, 大部分滑坡形态均相对不太完整, 局部改造较多, 部分改造主要发生在滑体前缘。如图 5 所示研究区典型滑坡形态特征, 包括滑源区圈椅状地貌形态、堆积区边界地形变化、滑源区光滑表面等均是该区域滑坡判识的典型标志。

基于 LiDAR 的泥石流解译, 关键在于对泥石流发育地形地貌、沟口堆积扇和沟道不良地质体的准确判识(赵聪等, 2023), 综合这三方面的结果进行最终判断。泥石流沟在地形上是有利于降雨



a. SBAS-升轨; b. Stacking-升轨

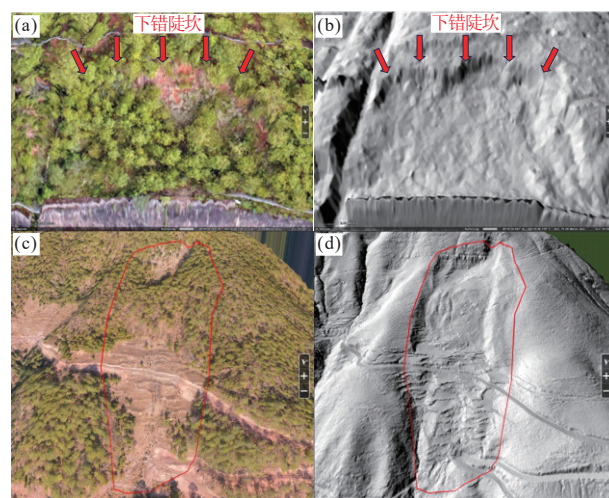
图 4 光明镇则约滑坡 InSAR 形变监测图

Fig. 4 InSAR deformation monitoring map of the Zeyue landslide in Guangming Town

汇聚入沟的平面负地形; 同时沟道内不良地质体的存在为泥石流提供可流动物源; 在一定降雨条件下可流动物源在沟道内汇聚, 高速流向沟口形成堆积扇, 因此泥石流解译最主要的判别对象是堆积扇与松散物源。区内泥石流主要发育于地形切割强烈的冕山镇、且拖乡后山(图 6), 如 QT-NSL1 泥石流沟位于且拖乡中心校北侧沟谷区, 泥石流平面展布形态呈“栎叶状”, 流域面积为 1.29 km^2 , 主沟长约 1.72 km , 沟床内受季节性流水冲刷, 块石裸露, 零星有灌木发育, 沟床两侧多乔木覆盖, 其中泥石流沟中部人为改造为梯田, 地表裸露, 流域沟道两侧发育多处崩滑物源, 沟口及后缘为自然斜坡, 植被较发育; MSZ-NSL1 和 MSZ-NSL2 泥石流位于冕山镇后山, 同样发育“栎叶状”流域平面形态, 通过无人机载 LiDAR 对植被的有效过滤, 在沟道及其两侧斜坡识别了多处崩滑物源和沟道物源。

2.2 精细化斜坡详查

为了进一步对前期“天基”与“空基”综合遥感识别隐患进行现场核查以及优化地灾遥感识别解译标志, 对研究区开展了基于斜坡单元的地面精细化地灾详查。在广泛收集承灾体资料的基础上, 基于高精度地形数据, 开展调查区主要承灾体分布区斜坡单元划分(王家柱等, 2023)。以斜坡单元为基本调查单元, 开展孕灾地质条件调查, 提取不同斜坡单元地质灾害主要孕灾因子, 对前期遥感解译地灾隐患进行现场核查, 通过正反互馈筛选并



a、b. LHK-HP1; c、d. QT-HP2

图 5 典型滑坡 LiDAR 识别特征

Fig. 5 LiDAR identification characteristics of typical landslides

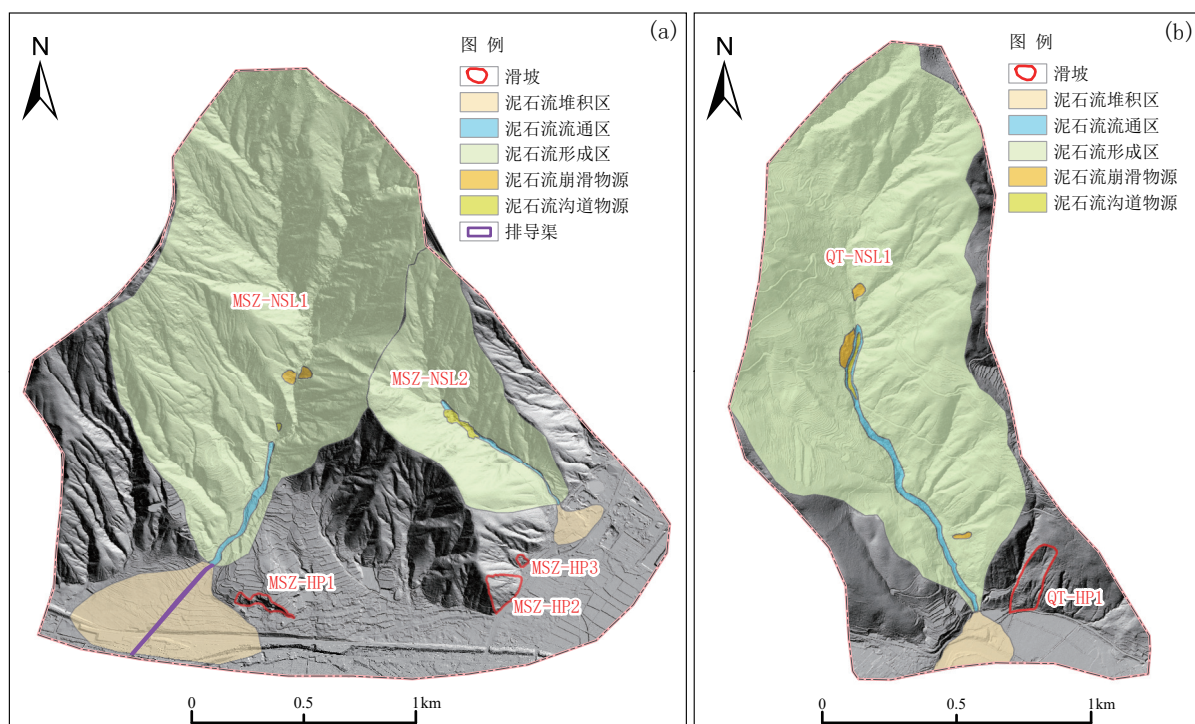


图6 冕山镇、且拖乡城镇后山斜坡地质灾害LiDAR解译(a.冕山镇;b.且拖乡)

Fig. 6 LiDAR interpretation of geohazards on the back slopes of Mianshan Town and Qietuo Town

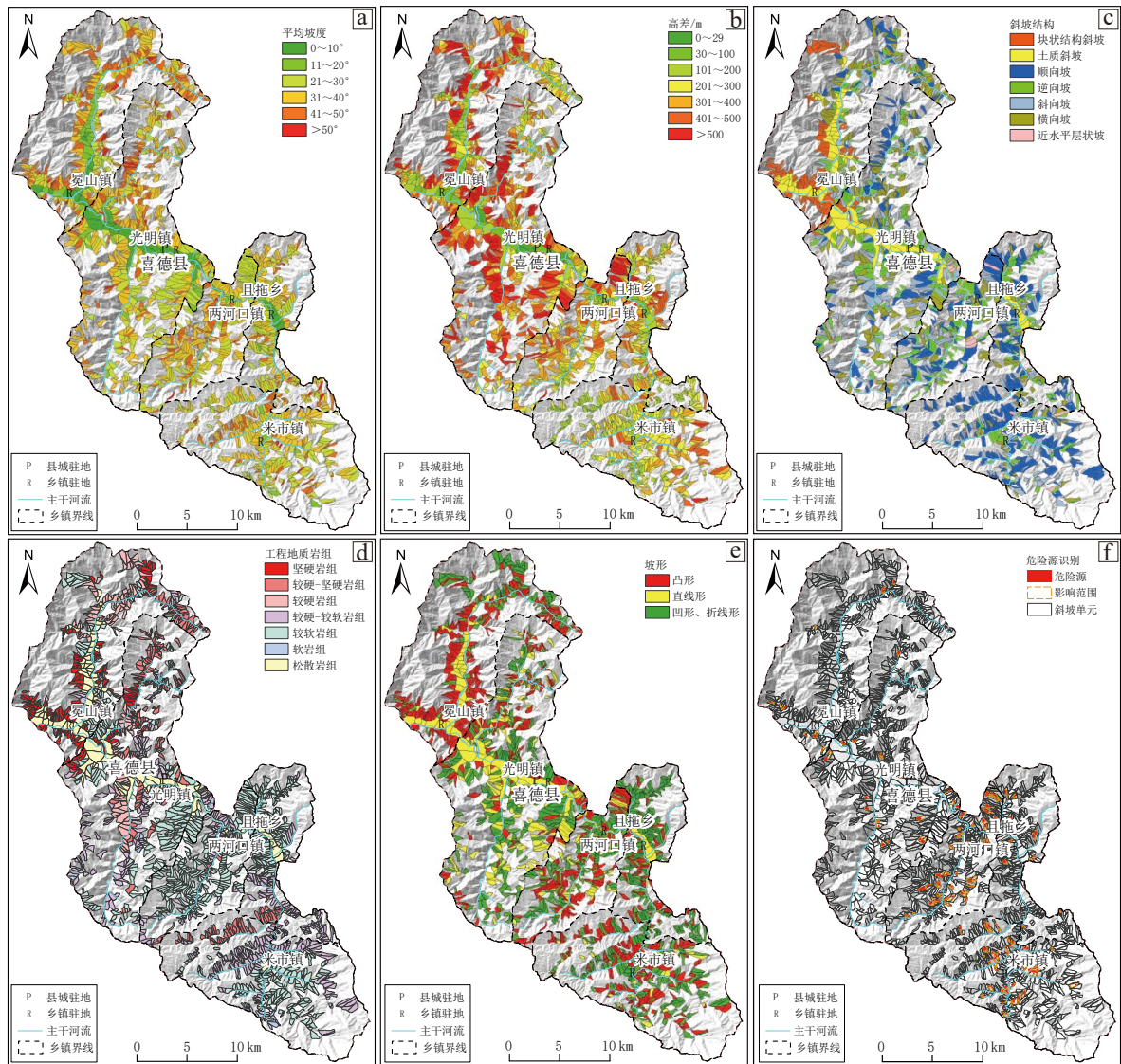
提取不同地质灾害的表征标志。本次喜德县重点乡镇斜坡孕灾地质条件调查包括地形地貌、地质构造、工程地质岩组、斜坡结构、水文地质条件、人类工程活动、已有变形迹象等,通过收集的高精度地形数据叠加斜坡单元,结合野外现场调查,实现了斜坡单元主要孕灾要素的提取(图7a-7e)。对重点斜坡开展无人机正摄影像测量,根据研究区已有地质灾害变形破坏特征、边界条件、发育规律,通过地质地貌分析法、工程地质类比法、成因分析法等方法开展综合判定,实现地灾隐患的现场核实及潜在危险源的有效圈划(图7f)。

通过精细化地面斜坡详查,区内地质灾害孕灾因子主要包括工程地质岩组、斜坡结构、地质构造及地形地貌等,其中工程地质岩组与易灾斜坡结构是制约研究区地质灾害发育的关键,总结了区内典型斜坡地质灾害成灾模式(图8)。研究区孕育的不同类型地质灾害的工程地质岩组类型具有一定的差异,滑坡多发育于软硬互层岩组中,如米市镇、两河口镇等侏罗系、白垩系松软红层;崩塌主要发育于冕山镇、光明镇坚硬、较坚硬岩组中,如花岗岩体、碳酸盐岩等地层;不同类型松散物源及有利的地形地貌条件是泥石流孕育的关键。顺向型斜坡结构是斜坡致灾的主要控制结构,尤其缓倾顺向

坡上的软弱红层,在坡脚开挖或侵蚀形成一定的临空条件后,将沿基覆界面或顺层软弱面进一步发育为滑坡灾害,是滑坡地质灾害隐患的潜在危险源。冕山镇、光明镇西部等区域地形多高陡,节理裂隙与顺层结构面组合下的危岩垮塌是崩塌灾害多发的主要原因。此外,沿构造结构面侵入形成的高位花岗岩体也是重要的崩塌危险源。通过地面孕灾地质条件的详细调查,区内滑坡隐患识别标志主要包括软弱红层地质岩组、宽缓向斜两翼的顺向斜坡等;崩塌隐患识别标志主要包括高陡斜坡、坚硬岩组、构造变形强烈区段;泥石流隐患识别标志包括“栎叶状”流域平面形态、流域内强烈构造变形、丰富的松散物源等。

2.3 斜坡深部结构探查

为进一步判识缺乏地形地貌及变形迹象特征的潜在不稳定斜坡,地球物理探查是前述综合遥感手段与传统地面调查的重要补充,可有效识别深部物质结构特征、潜在滑面的发育情况。物探探查的原理主要基于不同地质体在物理性质上的差异,采用电法、磁法、重力法、声波法等方法探查地下物理场的分布规律,通过观测、分析和研究这些物理场,并结合有关地质资料,实现对控灾结构面的精准识别。针对斜坡型地质灾害,目前广泛采用高



a. 斜坡单元平均坡度; b. 斜坡单元高差; c. 斜坡结构; d. 斜坡单元工程地质岩组; e. 斜坡坡形; f. 危险源识别分布

图7 斜坡精细化调查及潜在危险源识别

Fig. 7 Detailed slope investigation and identification of potential geohazard dangers in the study area

密度电阻率法开展斜坡深部结构探查。

喜德县重点乡镇区斜坡工程地质岩组多样、斜坡结构类型不一,沉积构造演化与风化改造叠加,综合作用塑造了独特的斜坡深部孕灾结构特征。通过对研究区典型代表性斜坡的高密度电法勘查,电阻率差异指示,有效查明了孕灾斜坡内部岩体破碎程度及裂隙发育特征,是对地质灾害隐患识别的重要佐证。区内滑坡主要发育于红层分布广泛的米市向斜一带,地层缓倾,多呈顺向坡,如两河口镇觉钉村安置区后山斜坡(图9),斜坡前缘河流切割强烈,临空条件较好,斜坡体上修建有大量房屋,加载及人类工程活动强烈,前期地面调查认为该滑坡

为浅层覆盖层滑坡,通过沿斜坡纵向的高密度电法物探测量,显示发育明显的近连续的低阻带,最深可达25 m,结合地表斜坡地质结构调查,该低阻带总体与缓倾的地层产状方向一致,为一潜在滑坡面,滑坡规模较前期地面调查认识明显增大。斜坡深部结构探查受成本制约,主要针对山区城镇、安置点等人员聚集区或重大工程后山斜坡,尤其是具备孕灾地质条件的斜坡区,如研究区顺向坡、软硬互层岩组分布区等。

3 识别结果分析

通过综合遥感识别、地面斜坡精细化调查、斜

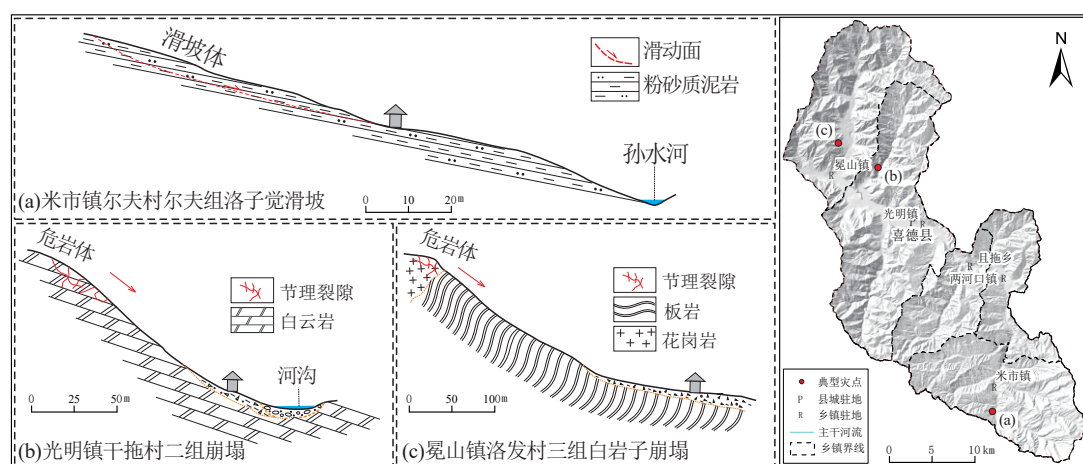


图 8 典型灾害成灾模式

Fig. 8 Disaster modes of typical geohazards in the study area

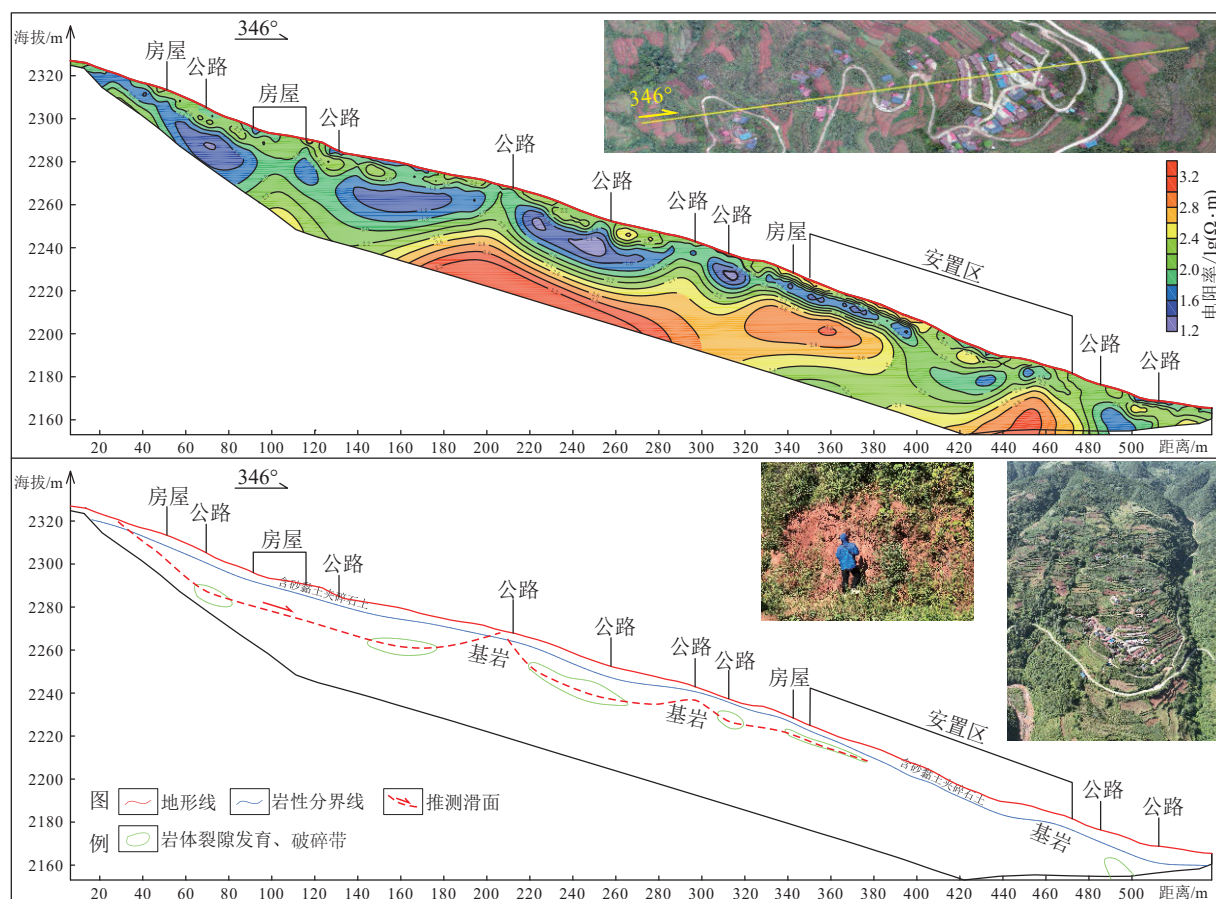


图 9 高密度电法物探地灾隐患识别

Fig. 9 Geohazard identification using high-density resistivity method

坡深部结构探查等“天-空-地-深”一体化手段的地质灾害隐患精细识别,从不同精度、不同角度对喜德县重点乡镇开展了地质灾害隐患的系统筛查,不同手段具有很好的互补性,综合识别效果较好

(图 10, 表 1)。

研究区光学遥感解译地灾隐患及不良地质体共 58 处,包括滑坡(10 处)、崩塌(7 处)、泥石流(22 处)等地质灾害隐患 39 处以及无威胁对象的

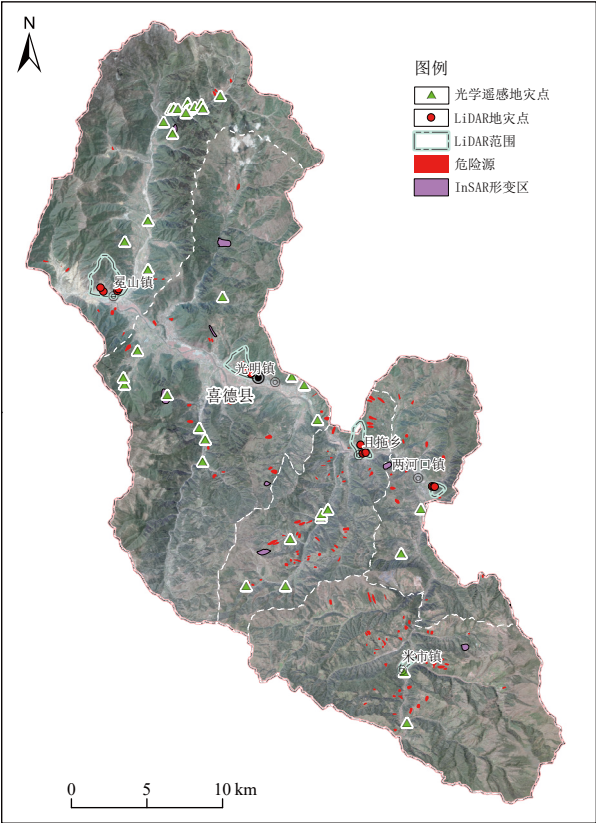


图 10 研究区地质灾害隐患精细识别分布图

Fig. 10 Detailed identification distribution map of geohazards in the study area

不良地质体 19 处。InSAR 解译形变区 8 处, 经过现场调查、无人机航摄及高清卫星影像复核, 最终确定地质灾害隐患点 2 处, 主要威胁分散农户及聚集区, 包括 1 处崩塌和 1 处滑坡, 其余 6 处形变区域内为林地、耕地及荒地, 无威胁对象。光学遥感与 InSAR 综合解译地质灾害 2 处。与已有地质灾害对比, 光学遥感和 InSAR 监测新识别地质灾害隐患共 17 处, 包括 4 处滑坡、5 处崩塌及 8 处泥石流。通过光学遥感影像能够较直观识别灾害范围及其威胁对象, 但对其稳定性认识不足, 而 InSAR 能够定量判定变形体及其变形强度, 但需要结合光学遥感图像进一步确定是否具有威胁对象以及其变形可能的诱发因素, 如修建道路引发的弃渣、流水侵蚀导致的浅表层溜滑等。此外, 少数老滑坡体尽管也有变形, 但已完成集体搬迁, 房屋已经荒废, 灾害点已完成销号。

针对威胁对象较多的重点城镇后山斜坡, 开展了无人机机载 LiDAR 测量及三维实景建模, 实现了更大比例尺、更高精度的地质灾害遥感识别, 共核实地质灾害隐患 15 处, 包括滑坡 12 处、泥石流 3 处, 其中新识别地灾隐患 12 处, 包括 11 处滑坡、1 处泥石流。滑坡在各乡镇后山均有发育, 与人类工程活动关系密切, 如光明镇 GMZ-HP1 滑坡, 边

表 1 地质灾害及隐患综合遥感识别统计表

Table 1 Comprehensive remote sensing identification of geohazards and their interpretation signs

地质灾害及隐患类型	识别方法	识别数量/处	主要识别标志	辅助识别标志
滑坡	光学遥感	10	地表地形破碎, 周界清晰, 可见下错台坎等。	坡面冲沟发育, 植被分布差异等。
	InSAR	1	“煎蛋状”环形形变干涉图, 自外环往内变形增强等。	
	LiDAR	12	“簸箕形”平面形态, 滑坡壁、滑坡台阶、滑坡舌、滑坡裂缝、滑坡鼓丘等地形。	不平整的坡体特征, 后缘陡坎植被稀疏, 地表裸露等。
崩塌	光学遥感	7	浅色调倒锥状碎石堆堆积体, 陡坎地形等。	岩浆岩及碳酸盐岩等坚硬岩组分布区, 前缘开挖等人类活动强烈等。
	InSAR	1	单一型形变干涉图, 图斑颜色变化较为单一等。	
	LiDAR	0		
泥石流	光学遥感	22	栎叶形、瓢形、桃叶形沟谷地貌, 谷坡松散物源分布, 沟口扇状地貌等。	堆积扇呈套叠现象, 谷坡植被破坏, 谷坡区大量修建消防通道的路渣等。
	InSAR	0		
	LiDAR	3	“栎叶状”流域形态, 沟道及其两侧斜坡发育崩滑物源和沟道物源, 沟口扇状地貌等。	沟床内流水冲刷, 块石裸露, 零星灌木发育等。

界清晰,呈圈椅状,滑坡后缘可见多级下错台坎与洼地,中部人为改造为梯田,梯田左侧零星分布多户民房,前缘则为成昆铁路及城镇区。

以斜坡为基本单元的地面精细调查和地质灾害隐患核查主要通过对有人斜坡开展逐坡的实地调查与地灾核查,实现对研究区地质灾害隐患本底的进一步认识,共识别与核查确认地质灾害隐患80处,包括已有灾害51处、光学遥感与InSAR新增识别17处、LiDAR新增识别12处,此外,识别潜在危险源131处,主要分布于米市镇、两河口镇、且拖乡等红层分布区,受顺向坡控制明显,尤其是米市向斜两翼。通过地质灾害隐患、潜在危险源分布与斜坡孕灾地质条件的相关性分析,研究区滑坡主要分布于较软、较硬—较软工程地质岩组的顺向型斜坡区,坡度 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$,高差 $100\sim 300\text{ m}$;崩塌主要分布于地形高陡、构造作用强烈的冕山镇、光明镇一带坚硬、较坚硬工程地质岩组中;泥石流的分布受松散物源和有利地形条件制约,在构造发育的冕山镇和且拖背斜内部较发育。

通过对比不同手段地质灾害隐患识别的效果与差异,结果显示,光学遥感在冕山镇、光明镇等构造变形强烈、坚硬岩组发育区具有较好的识别效果,如花岗岩、碳酸盐岩、变质岩等分布区,斜坡变形破坏后暴露的破碎岩体具有较强的光谱反射能力,在遥感影像上呈现出与周缘未变形区明显的反差,往往呈亮白色,是地质灾害隐患的重要指示,而米市镇、两河口镇、且拖乡等红层分布区地质灾害隐患更小,斜坡变形破坏前后遥感影像颜色差异较小,只能通过变形纹理等进行识别,因此更多需要高清无人机摄影配合精细的地面斜坡调查开展潜在危险源的圈划。InSAR可以识别斜坡的微小形变,但是大量的人类工程活动、浅表层流水侵蚀溜滑等非地质灾害因素的地表变形是其高效识别的主要干扰。采用LiDAR对研究区城镇后山斜坡地质灾害隐患进行识别,效果较好,尤其在针对滑坡的识别方面,通过过滤植被构建真实的地表数字模型使地表变形迹象得以更好地呈现,尽管受成本及后期数据处理耗时的限制,往往不能全区域开展,但LiDAR已成为针对威胁城镇等人口密集区致灾体开展地灾隐患识别的重要手段。

4 结论

(1)基于“天-空-地-深”方法的喜德县重点

乡镇地灾隐患识别,针对地质灾害的外在表现特征与内在斜坡结构,以综合遥感和物探探查为手段,着眼于地面精细调查,从不同精度、不同角度实现地质灾害隐患的系统识别,不同手段具有很好的互补性,综合识别效果较好,共识别地灾隐患80处,包括新增识别29处,此外,识别潜在危险源131处。

(2)研究区冕山镇、光明镇等构造变形强烈、坚硬岩组分布区的变形破坏岩体具有较强的光谱反射能力,光学遥感手段的地灾识别效果更好,而米市镇、两河口镇等软弱红层区通过地面斜坡详查及物探勘察可以更好地识别地质灾害隐患及潜在危险源;无人机载LiDAR高清三维影像对重点城镇后山斜坡普遍发育的“簸箕形”平面形态滑坡和“栎叶状”流域平面形态泥石流可有效实现精细识别。

(3)工程地质岩组与易灾斜坡结构是制约研究区地质灾害发育的关键,其中易滑软弱红层、易崩碳酸盐岩及花岗岩体是重要的易灾地质岩组,顺向型斜坡结构是斜坡致灾的主要控制结构,地面精细化斜坡调查的孕灾规律认识可进一步指导地质灾害的综合遥感识别和物探控灾结构面解译。

References

- Dang J, Dong J, He S B, et al., 2022. Application of airborne LiDAR and ground 3D laser scanning in geological hazard risk investigation of Dujiazhai collapse in Shuicheng, Guizhou[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 33 (4): 106 - 113 (in Chinese with English abstract).
- Francesca B, Ivan C, Paolo M, et al., 2011. Displacement patterns of a landslide affected by human activities: Insights from ground-based InSAR monitoring[J]. Natural Hazards, 59: 1377 - 1396.
- Ge D Q, Dai K R, Guo Z C, et al., 2019. Early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies: Thoughts and recommendations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 44 (7): 949 - 956 (in Chinese with English abstract).
- Huang H F, Xue R H, Zhao B B, et al., 2022. The bedding rock landslide identification in the head area of the Three Gorges Reservoir combined with disaster pregnant mechanism and comprehensive remote sensing method[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 51 (10): 2056 - 2068 (in Chinese with English abstract).
- Jia H J, Wang L J, Fan D L, 2021. The application of UAV LiDAR and tilt photography in the early identification of geo-hazards[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 32 (2): 60 - 65 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Q K, Lei W, Liu J Q, 2023. Exploration of Gesala giant landslide accumulation in Yanbian County by high-density electrical method[J].

- Science Technology and Engineering, 23 (5): 1853 – 1866 (in Chinese with English abstract).
- Liu X H, Yao X, Yu K B, et al., 2020. Remote sensing integrated identification of geological hazards in the Batang- Mangkang section of the Sichuan-Tibet highway[J]. Advanced Engineering Sciences, 52 (6): 49 – 60 (in Chinese with English abstract).
- Nicola C, William F, Stefano M, et al., 2017. Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning[J]. *Geoenvironmental Disasters*, 4 (1): 1 – 23.
- Scaioni M, Longoni L, Melillo V, et al., 2014. Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives[J]. Remote Sensing, 6 (12): 9600 – 9652.
- Qin J X, Xia Z, Zhang C J, et al., 2001. Sequence filling succession and sedimentary dynamic evolution of the Xichang Compound Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 3 (4): 45 – 55 (in Chinese with English abstract).
- Tan D J, Yin C P, 2020. Classification and processing of airborne laser LiDAR point clouds in complex mountainous areas with high vegetation cover[J]. *Advances in Geosciences*, 10 (7): 616 – 621 (in Chinese with English abstract).
- Wang J Z, Gao Y C, Tie Y B, et al., 2023. Landslide susceptibility assessment based on slope units of mountainous cities and towns: A case study of Kangding city[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43 (3): 640 – 650 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y S, Li Y G, 1996. Formation and evolution of the Xichang Basin[J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 23 (1): 85 – 90 (in Chinese with English abstract).
- Wu M T, Fang Y F, Zhuo G C, et al., 2023. Comprehensive remote sensing identification of potential geohazards in Sanjiacun reservoir bank of Baihetan[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 48 (3): 53 – 61 (in Chinese with English abstract).
- Xu Q, Dong X J, Zhu X, et al., 2023. Landslide collaborative observation technology based on real scene 3D view from Space-Air-Ground-Interior perspective[J]. Journal of Engineering Geology, 31 (3): 706 – 717 (in Chinese with English abstract).
- X Q, Guo C, Dong X J, 2022. Application status and prospect of aerial remote sensing technology for geohazards[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 51 (10): 2020 – 2033 (in Chinese with English abstract).
- XU Q, 2020. Understanding and consideration of related issues in early identification of potential geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 45 (11): 1651 – 1659 (in Chinese with English abstract).
- Zhuo G C, Dai K R, Zhou F J, et al., 2022. Monitoring typical construction sites of Sichuan-Tibet traffic corridor by InSAR and intensive distortion analysis [J]. Earth Science, 47 (6): 2031 – 2047 (in Chinese with English abstract).
- Zhao C Y, Liu X J, Gao Y, et al., 2022. Early identification of high-elevation geohazards in the lower Yarlung Zangbo River based on the SAR/InSAR technology[J]. Journal of Geomechanics, 28 (6): 981 – 994 (in Chinese with English abstract).
- Zhao C, Tie Y B, Liang J T, 2023. Quantitative evaluation of debris flow provenance erosion based on Airborne Lidar Technology[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43 (4): 808 – 816 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 党杰, 董吉, 何松标, 等, 2022. 机载 LiDAR 与地面三维激光扫描在贵州水城独家寨崩塌地质灾害风险调查中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 33 (4): 106 – 113.
- 葛大庆, 戴可人, 郭兆成, 等, 2019. 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, 44 (7): 949 – 956.
- 黄海峰, 薛蓉花, 赵蓓蓓, 等, 2022. 孕灾机理与综合遥感结合的三峡库首顺层岩质滑坡隐患识别[J]. 测绘学报, 51 (10): 2056 – 2068.
- 贾虎军, 王立娟, 范冬丽, 2021. 无人机载 LiDAR 和倾斜摄影技术在地质灾害隐患早期识别中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 32 (2): 60 – 65.
- 蒋全科, 雷宛, 刘俊琪, 2023. 利用高密度电法勘探盐边县格萨拉巨型滑坡堆积体[J]. 科学技术与工程, 23 (5): 1853 – 1866.
- 刘星洪, 姚鑫, 於开炳, 等, 2020. 川藏高速巴塘-芒康段地质灾害遥感综合早期识别研究[J]. 四川大学学报 (工程科学版), 52 (6): 49 – 60.
- 覃建雄, 夏竹, 张长俊, 等, 2001. 西昌复合盆地层序充填序列与沉积动力演化初探[J]. 古地理学报, 3 (4): 45 – 55.
- 谭德军, 尹晨洋, 2020. 高植被覆盖复杂山区机载激光 LiDAR 点云分类与处理[J]. 地球科学前沿, 10 (7): 616 – 621.
- 王家柱, 高延超, 铁永波, 等, 2023. 基于斜坡单元的山区城镇滑坡灾害易发性评价: 以康定为例[J]. 沉积与特提斯地质, 43 (3): 640 – 650.
- 王运生, 李云岗, 1996. 西昌盆地的形成与演化[J]. 成都理工学院学报, 1996, 23 (1): 85 – 90.
- 吴明堂, 房云峰, 卓冠晨, 等, 2023. 白鹤滩库区三家村库岸地质灾害隐患综合遥感识别[J]. 昆明理工大学学报: 自然科学版, 48 (3): 53 – 61.
- 许强, 董秀军, 朱星, 等, 2023. 基于实景三维的天-空-地-内滑坡协同观测[J]. 工程地质学报, 31 (3): 706 – 717.
- 许强, 郭晨, 董秀军, 2022. 地质灾害航空遥感技术应用现状及展望[J]. 测绘学报, 51 (10): 2020 – 2033.
- 许强, 2020. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 45 (11): 1651 – 1659.
- 卓冠晨, 戴可人, 周福军, 等, 2022. 川藏交通廊道典型工点 InSAR 监测及几何畸变精细判识[J]. 地球科学, 47 (6): 2031 – 2047.
- 赵超英, 刘晓杰, 高杨, 等, 2022. 基于 SAR/InSAR 技术的雅鲁藏布江下游高位地质灾害早期识别[J]. 地质力学学报, 28 (6): 981 – 994.
- 赵聪, 铁永波, 梁京涛, 2023. 基于机载 LiDAR 技术的泥石流源侵蚀量定量评价研究[J]. 沉积与特提斯地质, 43 (4): 808 – 816.