

DOI: 10.12401/j.nwg.2023069

多源遥感技术在降雨诱发勉县地质灾害调查中的应用

贾俊^{1,2,3,4}, 李志忠¹, 郭小鹏^{1,3,*}, 武文英^{1,3}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 2. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 3. 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710119; 4. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 陕南秦巴山区地形地貌、地质构造和气候条件复杂, 易发和频发滑坡、泥石流等地质灾害。由于该区地形高差大且植被覆盖率高, 传统的人工地面调查排查在地质灾害的调查识别中难度较大, 需借助先进的地质灾害监测识别技术方法。笔者综合采用光学遥感、合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 和无人机航测等多种技术手段, 对陕南勉县“8.22”强降雨诱发的地质灾害进行应急调查与识别分析, 探索多源遥感技术对降雨诱发型地质灾害的识别能力与有效性。研究表明, 多源遥感技术在强降雨诱发区域性地质灾害的识别和应急调查中能够发挥重要作用, 可大大减少现场工作时间, 并能提供全方位、多角度和可视化的高精度遥感成果; 光学遥感、InSAR、无人机航测等技术具有各自的优势和识别范畴, 仅靠单一的技术手段难以完全有效地解决灾害隐患识别问题, 建立一套多源遥感技术相互融合、优势互补的综合调查识别体系, 是强降雨条件下区域性地质灾害快速调查识别与评价的有效途径。

关键词: 地质灾害; 光学遥感; InSAR 技术; 无人机; 勉县

中图分类号: P694; X43

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0268-13

Application of Multi-source Remote Sensing Technology on Investigation of Geological Disasters Induced by Rainfall in Mian County

JIA Jun^{1,2,3,4}, LI Zhizhong¹, GUO Xiaopeng^{1,3,*}, WU Wenying^{1,3}

(1. Xi'an Center of China Geologic Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MNR, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 4. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: Qinba Mountain Area in southern of Shaanxi province has characteristics of complex terrain and geomorphology, geological structure and climate conditions, and is prone to occurrence of landslide, debris flow and other geological disasters. Due to the large topographic elevation difference and high vegetation coverage in this area, the traditional artificial field investigation is difficult in the identification and investigation of geological disasters, and thus the advanced geological disaster monitoring and identification methods are needed. In this study, a variety of technical methods including optical remote sensing, InSAR and unmanned aerial vehicle photography are used to identify and analyze the hidden dangers of geological disasters induced by “8.22” heavy

收稿日期: 2023-03-10; 修回日期: 2023-04-20; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 中国地质调查局项目“西北典型地区地质灾害调查”(DD20221739), “黄土高原等典型地区地质灾害精细调查与风险管控”(DD20221739)联合资助。

作者简介: 贾俊(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地质灾害调查与风险评估研究工作。E-mail: jiajun@mail.cgs.gov.cn。

* 通讯作者: 郭小鹏(1991-), 男, 博士, 助理研究员, 从事地质灾害调查与防治方法研究工作。E-mail: sjcexp@163.com。

rainfall in Mian County, southern Shaanxi province, and to explore the identification ability and effectiveness of multi-source remote sensing technology for rainfall-induced geological disasters. The research shows that multi-source remote sensing technology can play an important role in the identification and emergency investigation of regionally geological disasters caused by heavy rainfall. Moreover, the multi-source remote sensing technology can greatly save the working time in field, and provide high-precision remote sensing results with virtue of all aspects, multi-angle and visibility. Optical remote sensing, InSAR, and unmanned aerial vehicle photography have their own advantages and identification categories. It is difficult to completely and effectively solve the problem in hazard identification only by means of a single technical approach. Establishing a multi-source remote sensing-based comprehensive identification system with characteristics of mutual integration and complementary advantage is an effective way to the rapid identification and evaluation of regional geological disasters under heavy rainfall conditions.

Keywords: geological disaster; optical remote sensing; InSAR technology; unmanned aerial vehicle; Mian County

卫星遥感技术可实现大范围快速成像覆盖,其具有瞬时成像、远程传输、动态更新、信息综合、受地面条件限制少等诸多优点,已被应用于气象、海洋、环境、地质等不同领域(李志忠等, 2009, 2022a, 2022b; 韩海辉等, 2022)。随着遥感技术的飞速发展,星载高分辨率光学遥感与 SAR(Synthetic Aperture Radar)遥感、机载和地面 LiDAR(Light Laser Detection and Ranging)、无人机航测等技术在地质灾害隐患探测识别中的应用日益广泛(张茂省等, 2007, 2019; Dong et al., 2018; 丁辉等, 2019; 陆会燕等, 2019; 丁辉等, 2019; Meng et al., 2021)。借助遥感技术的非接触测量、覆盖范围广、空间分辨率高、数据易获取等优势,综合运用多种遥感技术手段,获取地质灾害隐患空间分布、形态特征、形变范围以及形变量级等信息,可为强降雨地质灾害探测识别、灾情评估、趋势预测提供强有力的技术支撑(许强等, 2019)。强降雨诱发型地质灾害指的是受强降雨作用后直接导致的地质灾害,主要包括滑坡、泥石流和坡面泥流,其特点是在降雨期间灾害体才出现变形并在短时间内失稳破坏,表现出显著的突发性(许强, 2020)。

秦岭山区地形地貌复杂,山高坡陡,岩性复杂多变,在河流侵蚀、活动构造、人类活动、气候变化等因素作用下使得该区地质灾害易发、多发(陆松年等, 2004; 黄玉华等, 2015),其中陕南安康、商洛和汉中三市地质灾害尤为严重,占秦岭山区灾害总量的78.08%(宁奎斌等, 2018)。2021年5~10月,陕南秦巴山区遭受了多轮次大范围强降雨袭击,多地降雨量达到有气象记录以来的历史极值。该轮强降雨对当地的生命和财产造成了严重损失,同时诱发了大量的

滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害。8月21日18时至8月22日18时,陕西省汉中市勉县县域北部山区遭受特大暴雨袭击,24h降雨量达314.8mm,强降雨导致勉县多条河流洪水泛滥,引发了大量次生地质灾害,致使全县10余万人受灾,公共设施损毁严重,直接经济损失约7.5亿元。

勉县本次强降雨诱发的地质灾害具有突发性强、分布范围广、危害严重等特点。全面快速地获取降雨诱发地质灾害的分布、特征、危害等灾情信息,对于减少灾害损失、预防次生灾害以及服务政府应急响应和灾后重建等都具有重要的意义。然而,由于需要监测的面积较大且部分地区山高谷深、道路受阻,传统地质调查手段在滑坡灾害隐患排查工作中很难在较短时间内达到大范围地覆盖。鉴于此,综合采用光学遥感解译、合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)形变分析以及无人机航测等技术手段,对勉县“8.22”强降雨诱发的地质灾害隐患开展调查识别与分析,并探索多源遥感技术对降雨诱发地质灾害的调查识别能力与有效性。研究成果可为秦岭地区降雨诱发型地质灾害的调查识别和防控提供一定的参考和借鉴意义。

1 工作区概况

勉县地处秦巴山区汉中盆地西端,属汉江上游谷地。该县地势北、西、南部较高,向中东部逐渐变低。南北两侧为丘陵区和中低山区,西部主要为低中山区,中部则为汉江冲积平原(盆地)。勉县横跨扬子秦

岭微板块两大构造单元(图1),地层岩性复杂,区内广泛分布有片岩、千枚岩、板岩等软弱薄层状浅变质岩类,河谷两侧岸坡以更新统、全新统湖积、冲积、洪积和坡积层为主,以上两类岩土体是区内地质灾害的主要物质来源(图2)。构造位置处于勉-略构造带与勉县-阳平关断裂构造带交汇部位,构造格架总体表现为NWW向和NEE向及其与两断裂平行的次级断裂组(王东升等,2021)。受区域构造影响,区内岩体节理裂隙十分发育,对地质灾害的孕育与形成起着极其重要的作用(黄玉华等,2015)。

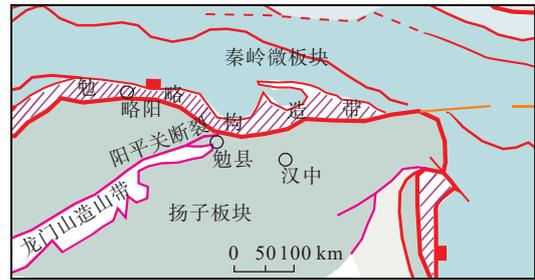


图1 勉县及邻区构造简图

Fig. 1 Simplified tectonic map of Mian County and its adjacent areas

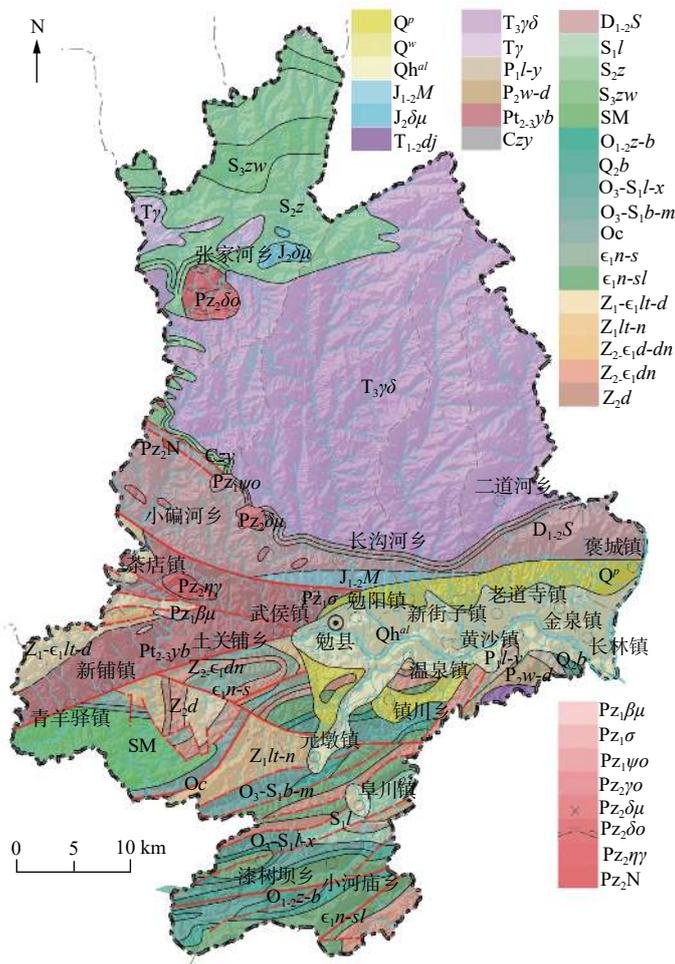


图2 勉县区域地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of Mian County

勉县境内具有地形地貌复杂、构造活动强烈、岩体软弱多样、极端气候和工程活动强度大等特点,导致区内地质灾害十分发育。根据勉县地质灾害防治方案,截止到2020年底,勉县共有地质灾害在册隐患点101处,其中滑坡90处、崩塌7处、地面塌陷3处和泥石流1处。从地质灾害发生背景、致灾因子分析,地质灾害的发生与降雨密切相关,主

要集中在5~10月,其中7~9月为地质灾害的高发期。

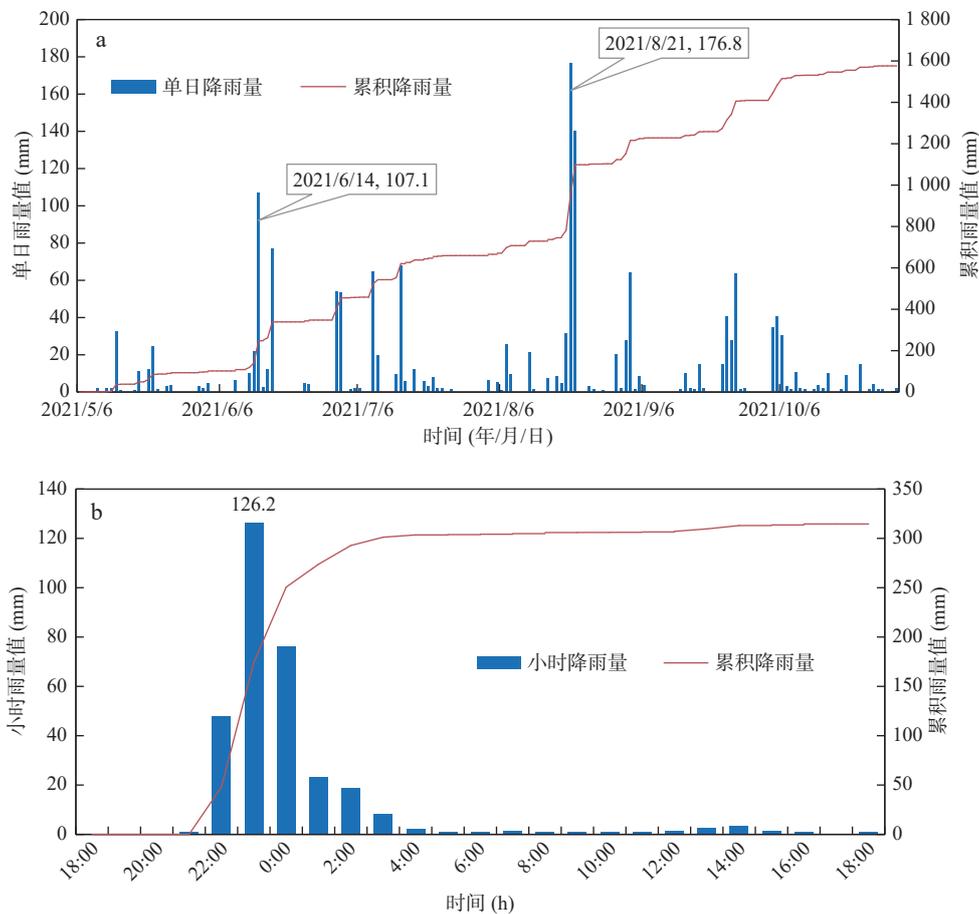
2 “8.22”降雨特征及诱发地质灾害类型

勉县气候属北亚热带大陆季风气候,雨量充沛,

时空分布不均,受地理因素影响,降水差异性大,夏季多雨,初秋多连阴雨,年平均降水量为 845 mm, 平均年降水量为 598.6~1 522.7 mm。通过多年降雨数据统计可知,勉县局部地区暴雨时常发生,主要以雷阵暴雨的形式出现。勉县南部山区暴雨发生率高于北部山区,而北部山区高于平川地区。暴雨通常来势迅猛,造成山洪暴发,引发地质灾害,损失惨重。

2021年5~10月,勉县较大的日降雨量发生于6月14日和8月21日,日降雨量分别为107.1 mm和176.8 mm(图3a)。2021年7月初至9月中旬,勉县全

县境内平均累积降水量为 593.3 mm,比2020年同期(342.4 mm)增加了近60%,全县22个气象监测站统计的累积降水量为239.5~737.1 mm。勉县国家气象站统计的累积降水量为645.7 mm,比2020年同期(276.9 mm)增加1.3倍,突破历史极值。2021年8月21日18时至8月22日18时,长沟河镇两河口村张家沟滑坡普适型示范站雨量计监测到24 h降雨量达314.7 mm,其中21日22时至22日2时,4 h降雨量达273.3 mm,最大小时雨量为126.2 mm,均为勉县有气象监测数据以来历史极值(图3b)。



a. 日降雨量和累积降雨量监测曲线; b. 8月21日18时至22日18时小时降雨量和累积降雨量监测曲线

图3 降雨量监测曲线

Fig. 3 Monitoring curves of rainfall

通过对强降雨后勉县地质灾害综合遥感识别和现场调查验证后确认,“8.22”强降雨共诱发新增地质灾害34处,其中滑坡和泥石流各17处。滑坡均为小型滑坡,泥石流包括11处小型泥石流、5处中型泥石流和1处特大型泥石流。

3 地质灾害多源遥感调查识别方法

遥感技术的不断发展使得“空-天-地”遥感观测与现场核验一体化的地质灾害隐患探测识别技术体

系不断趋于完善。多种观测技术手段相融合的多源遥感技术正在改变着地质灾害传统调查识别方法,已成为强降雨区地质灾害调查识别的重要手段。面对“8.22”勉县强降雨后地质灾害严峻复杂的防灾形势,采用光学遥感、InSAR、无人机航测等多源遥感技术,系统开展了县域范围内降雨型地质灾害的识别与调

查。本次勉县强降雨区地质灾害综合遥感调查识别,运用高分辨率光学遥感、InSAR、无人机航测等综合遥感技术,发挥各技术手段的优势,最大限度地识别强降雨诱发的突发性地质灾害,提升地质灾害定位和特征识别的准确度与效率。多源遥感技术调查识别降雨型地质灾害的流程图(图4)。

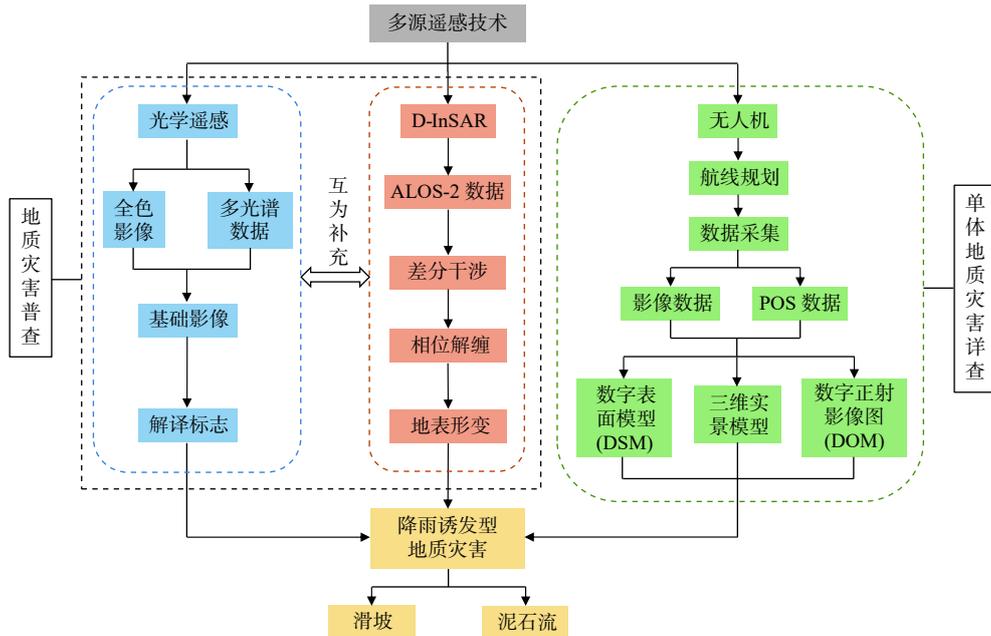


图4 多源遥感技术调查识别地质灾害流程图

Fig. 4 Flow chart of geological hazard investigation and identification by multi-source remote sensing technology

3.1 光学遥感方法

地质灾害光学遥感识别主要是通过利用光学卫星影像和其他辅助数据对地质灾害的位置、形状、大小、阴影、色调、颜色、纹理、图案、影响范围等解译标志识别具体的灾害类型,并圈定地质灾害发生及其潜在隐患的位置范围(刘星洪等, 2020)。20世纪90年代以后, IKONOS、QuickBird等高分辨率的卫星影像被广泛用于地质灾害探测与监测。目前,光学遥感正朝着高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率的方向发展(许强等, 2019),其最高级别的影像分辨率可达亚米级(刘星洪等, 2020)。基于光学遥感数据的降雨型地质灾害的识别采用降雨前后两期(2021年8月1日和8月23日)高分一号2 m分辨率全色影像和8 m分辨率多光谱数据。数据经过辐射定标、正射校正、图像融合、图像裁剪等预处理,形成遥感解译所需基础影像数据(王志一等, 2018)。通过建立地质灾害解译标志,采用目视解译方法,对比降雨前后两期影像数据,从而对强降雨发生后的地质灾

害进行解译识别。

3.2 D-InSAR 技术

光学遥感解译虽是目前滑坡灾害隐患大范围早期识别主要手段之一,但其受云雾环境的影响较大,且通常只对较大地貌特征进行定性解译(戴可人等, 2020)。与传统光学遥感技术相比, InSAR技术具有全天候、全天时、可穿透云雾、覆盖范围广、空间分辨率高、非接触、综合成本低等优点,适宜于开展大范围地质灾害普查、地表形变分析与长期持续观测,可为地质灾害隐患早期识别与分析提供有力的数据支撑(姚鑫等, 2016; Xu et al., 2020),特别是 InSAR具有大范围连续跟踪微小形变的特性,使其对变形区具有独特的识别能力(许强等, 2019)。对于植被覆盖度大和坡体快速大变形等情况,前后两期 SAR数据会失去相干性,使得持续变形监测能力失效。差分 InSAR(D-InSAR)技术能监测两时相间发生的相对形变,虽无法获取研究区地表形变随时间的演化过程,但适用于2个时间间隔内突发性的变形监测,目前已被广泛应用

于滑坡、泥石流等地质灾害的应急调查,在应用中具有很好的效果(黄洁慧等, 2019; Dai et al., 2019; 李万林等, 2021)。

D-InSAR 主要处理步骤包括影像配准、干涉及空域滤波、相位解缠、地理编码等步骤。对配准及重采样后的影像进行干涉处理得到干涉相位,利用数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)去除地形相位得到差分相位,再进行解缠计算得到形变相位,最后经过地理编码得到地表变形,其解精度可以达到厘米级甚至毫米级(苏晓军等, 2021)。SAR 系统在 2 个不同时间对同一区域进行两次成像可以获取两幅单视复数影像,将这两幅影像配准重采样并共轭相乘形成一幅干涉图,干涉图中每个像元的干涉相位包含该点相对于参考位置的高程和形变信息(蔡杰华等, 2020)。由于大气和地表环境在空间和时间上处于不断变化之中,导致干涉图中的干涉相位受到影响,进而使得最终的干涉测量结果产生偏差(李振洪等, 2019)。考虑各方面影响,干涉图中任意干涉相位 φ_{int} 可以表示为:

$$\varphi_{\text{int}} = W\{\varphi_{\text{orb}} + \varphi_{\text{dem}} + \varphi_{\text{dis}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}}\} \quad (1)$$

式中: $W\{\dots\}$ 为缠绕运算;干涉相位主要包括轨道差异引起的相位分量 φ_{orb} 、地形起伏 φ_{dem} 、地表形变 φ_{dis} 、大气相位延迟 φ_{atm} 和噪声分量 φ_{noise} 。D-InSAR 主要用途之一是准确提取由地表形变造成的形变分量 φ_{dis} 。上式中等号右边前两项可以利用传感器的轨道信息和 DEM 准确模拟并从干涉相位中剔除,大气相位延迟 φ_{atm} 和噪声分量 φ_{noise} 可通过各种滤波方法在一定程度上得到抑制消除。通过二维空间解缠就可以从干涉相位 φ_{dis} 中解算出地表形变,进而利用地质灾害所表现出的形变信号来识别隐患(蔡杰华等, 2020)。

针对勉县地形复杂、植被覆盖度高、潜在变形区范围广等特点,采用 D-InSAR 技术对勉县降雨前后 2 个时间间隔内的地表变形进行了监测,计算中的 SAR 数据采用 ALOS-2 卫星上最先进的 L 波段合成孔径雷达(PALSAR-2)获取的研究区内 2021 年 5 月和 2021 年 10 月 2 期 3 m 分辨率雷达干涉图像。差分干涉处理中选用 30 m 分辨率的 SRTM DEM 作为参考 DEM,进行去平地效应及地理编码。

3.3 无人机航测方法

虽然光学遥感技术和 InSAR 技术已被较多地应用于地质灾害隐患的早期识别中,但是两者均有各自的适用范围和局限性,不能生成高精度地质模型。而且仅依靠传统的人工地面调查排查,使得地质灾害调

查工作强度大且风险大,有时在个别区域人员无法到达,大大增加了灾害调查地难度和时间,难以在短时间内反馈出灾情信息,以至于延误抢险救灾。近年来,随着无人机技术的发展,采用无人机可灾害体开展高精度(可达厘米级)的垂直和倾斜摄影测量,快速准确地生成测区数字地形图、数字正射影像图(Digital Orthophoto Map, DOM)、数字地表模型(Digital Surface Model, DSM)和实景三维模型等数据(许强等, 2019)。无人机航测系统主要包括航摄平台和地面控制系统,其中航摄平台包括无人机平台和控制系统、航摄仪及其他辅助设备,地面控制系统包括无人机地面控制系统、航线规划系统和数据监控系统(杨燕等, 2017)。无人机具有独特的非接触式测量方式、精度高、灵活性强、360°全方位无死角等特点,为重大地质灾害应急调查提供了科学高效的现场影像采集和遥感成果处理方案,能大大提高应急处置效率、确定应急处置方案(董秀军, 2015; 叶伟林等, 2017; Hu et al., 2019)。无人机航测技术在灾情监分析、灾中抢险救灾、灾后重建决策中发挥着重要作用,其能够为抢险救灾提供地理信息保障,也能够为地质灾害数据收集、财产损失评估和灾后重建等提供技术支撑。

无人机航测的主要工作流程包括:场地选择→航迹规划→无人机遥感影像获取→影像预处理→可视化数字影像(正射影像 DOM 和数字高程影像 DEM)→成果数据应用。针对单体重大的地质灾害,通过无人机航测技术可多角度展现出灾害体特征以及周围区域的真实场景,清晰地展示灾害体的类型、规模大小、地形地貌特征以及灾害体及其影响区域范围,直观准确地辨识出地质灾害体的形态特征。采用的无人机为 DJI Phantom 4 Pro,该无人机配置有全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS)与 GPS 组合定位系统和惯性导航系统。无人机重量为 1 375 g,最大飞行海拔高度为 6 000 m,最长飞行时间为 30 min。相机传感器类型为 1 英寸 CMOS,其有效像素为 2 000 万,照片分辨率为 5 472×3 648,镜头焦距为 8.8 mm。

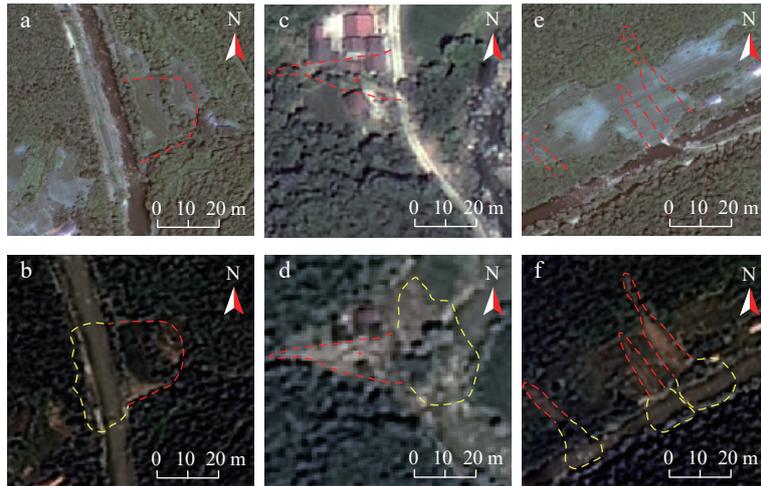
4 强降雨地质灾害多源遥感调查识别结果

4.1 光学遥感调查识别结果

滑坡识别特征:滑坡灾害通常呈簸箕形或舌形的平面形态,个别滑坡可见滑坡壁、滑坡舌、滑坡台阶、

封闭洼地等地貌特征(Li et al., 2019)。滑坡按照物质组成可划分为岩质滑坡与土质滑坡,土质滑坡后缘呈圈椅状,具有圆弧形滑面,后缘常见平行于滑坡壁的弧形拉张裂隙,前缘常见由于隆起形成的鼓胀裂隙与滑坡体向两侧扩散形成的扇形裂隙(陆会燕等, 2019);岩质滑坡边界通常由各组结构面控制,呈折线形,滑

坡前缘常有局部滑塌,后缘常见由节理发育形成的拉张裂隙(梁京涛, 2018)。由强降雨诱发的滑坡体颜色与周围地物的颜色存在明显的差异;从形状上,通过遥感影像可以看出滑坡壁一般呈圈椅状或其他形状,陡峭的滑坡壁及其滑坡周界表现为弯曲的弧形(图 5a)。



a.降雨前堆积层滑坡; b.降雨后堆积层滑坡; c.降雨前沟道泥石流; d.降雨后沟道泥石流; e.降雨前坡面泥流;
f.降雨后坡面泥流; 红色虚线为灾害体范围; 黄色虚线为灾害影响范围

图 5 降雨前后影像对比数据以及地质灾害隐患识别特征

Fig. 5 Image comparison before and after rainfall and identification characteristics of hidden dangers of geological disasters

泥石流识别特征: 泥石流通常发育在地形陡峻、纵坡降大的山区,典型泥石流流域可划分为物源区、流通区与堆积区(Tang et al., 2009)。泥石流按照流域形态可划分为沟谷泥石流与坡面泥流(王绚等, 2020)。其中,沟道泥石流流域呈扇形或狭长条形,沟谷地形沟长坡缓。最典型的识别标志为泥石流的堆积区,常见于沟口,呈圆弧扇形,即泥石流堆积扇,质感细腻且色调较浅,扇体上常见侵蚀沟,表现为线状阴影(王绚等, 2020)。坡面泥流属于浅层滑脱破坏,无明显流通区,浅层泥流受重力向下滑动对坡表植被影响相对较大,会明显造成泥流范围内植被与其他植被的不同,同时坡面泥流在影像上具有类似冲刷的迹象。

此次强降雨在勉县北部诱发的地质灾害类型主要为滑坡和泥石流。在遥感解译标志建立的基础上,室内解译并经野外现场校验核实,共有效识别地质灾害隐患点 112 处,主要分布于勉县县城的北部和西部的沟谷两侧,其中滑坡 70 处、崩塌 4 处、泥石流 22 处、坡面泥流 16 处(图 6)。

4.2 D-InSAR 技术调查识别结果

D-InSAR 分析结果显示: 勉县主城区及周边变

形强烈区主要集中于北部中高山区长沟河镇、同沟寺镇等区域(图 7a),与“8.22”强降雨集中区基本吻合;监测斜坡坡面最大变形量为 27.9 cm,多分布于沟谷两侧岸坡,斜坡变形以整体变形为主;长沟河两河口村滑坡于 8 月 22 日凌晨 4 点 30 分左右发生整体滑动,解译结果显示该滑坡区域产生了整体变形(图 7b)。值得注意的是,仅通过光学遥感解译结果(图 7c、图 7d)不能直观地判断长沟河两河口村滑坡的变形情况并圈定其滑坡边界,需借助于 InSAR 解译结果进行综合判断,这说明有时仅通过光学遥感影像很难识别隐蔽性的滑坡;InSAR 技术能对地表正在发生的大范围持续缓慢变形进行有效识别和监测,因而在地质灾害识别过程中有时需采用多种遥感技术手段相结合的方式,以弥补采用单一技术手段的局限性。

4.3 无人机航测调查识别结果

勉县北部秦岭山区植被茂盛,“8.22”强降雨导致区内产生大量的坡面泥流、沟谷泥石流等地质灾害,采用无人机航测获取的正射影像可清晰地识别出该类降雨型地质灾害(图 8a),准确获取滑坡堆

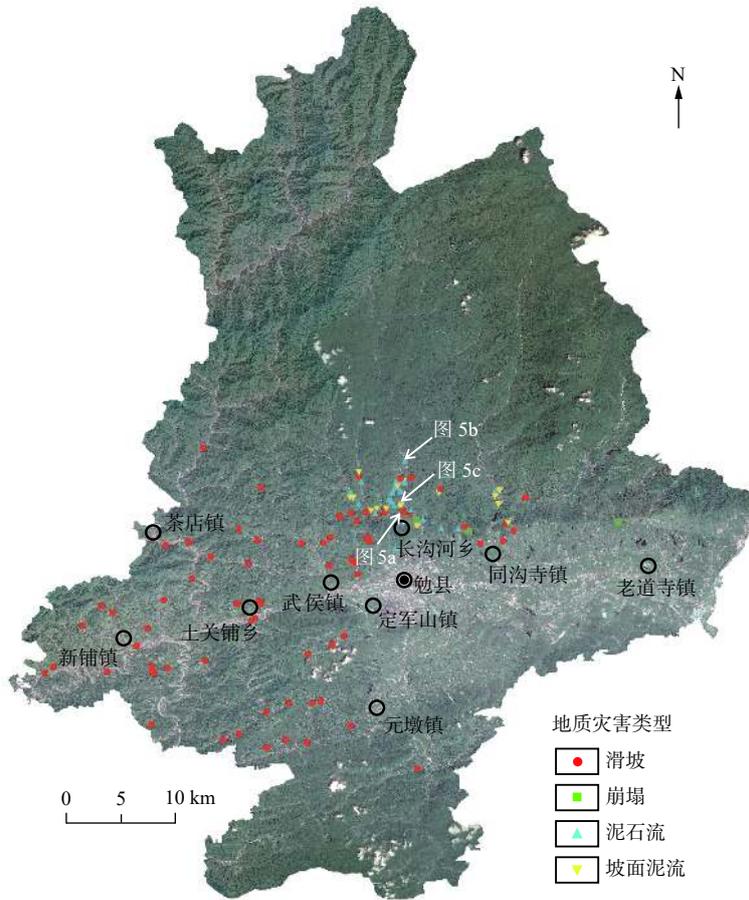


图 6 光学影像解译的勉县地质灾害分布图

Fig. 6 Distribution of geological hazards based on optical image interpretation in Mian County

积体范围、泥石流堆积扇范围、裂缝及其他变形特征, 该泥石流灾害点在光学遥感影像上也有明显的反映(图 8b)。

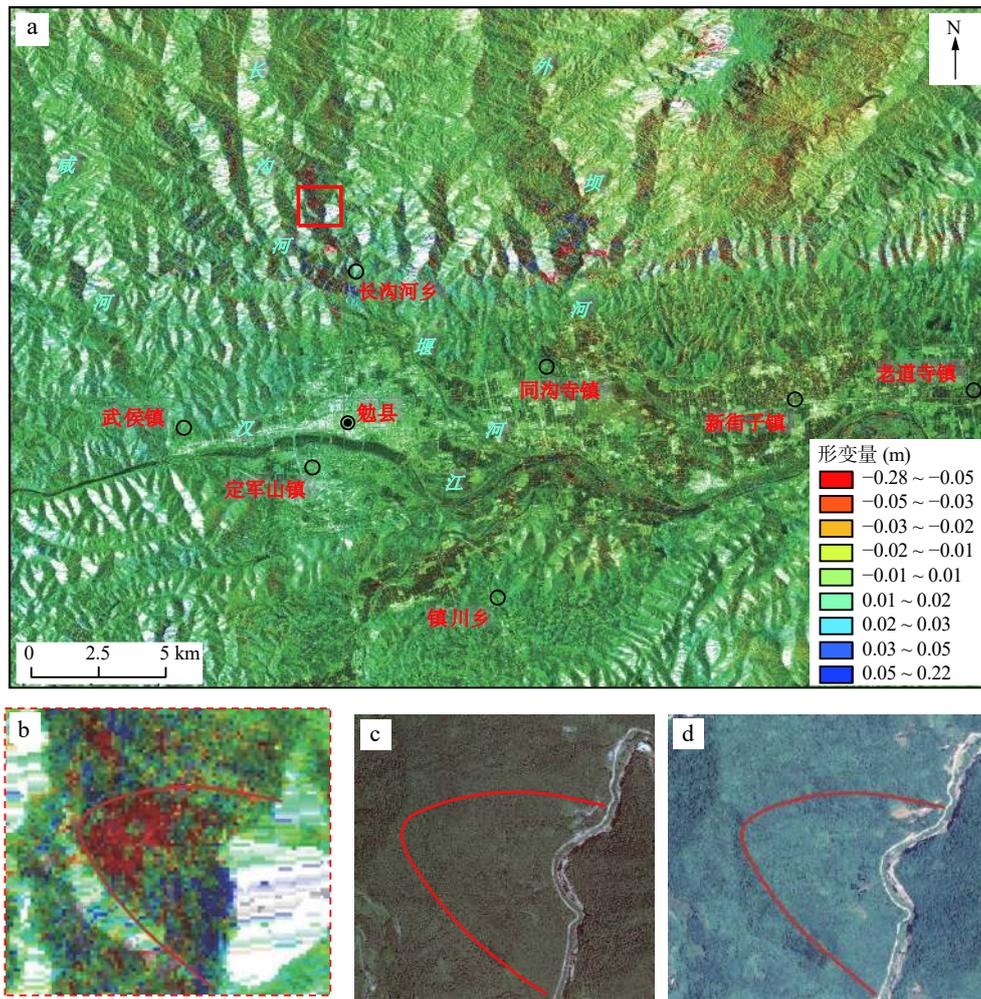
勉县“8.22”降雨灾情发生后, 研究人员携带无人机第一时间赶赴现场参与应急调查和测绘工作。针对转咀子村泥石流、两河口滑坡、关山梁滑坡等单体重大的地质灾害, 在前期光学遥感解译基础上, 开展单体地质灾害无人机航测, 获取高分辨率航拍数据; 采用高性能计算机集群联机处理并行计算, 利用 Pix4D mapper 软件对获取的影像数据、POS 数据进行无控空三加密; 获得高分辨率数字表面模型(DSM)和数字正射影像图(DOM), 选用 Context Capture Center Master 软件建立高分辨率三维实景模型。

采用无人机航测技术对 28 处重大单体地质灾害隐患进行了识别调查评估, 提供了准确的三维数据, 为降雨型重大地质灾害隐患现场调查和应急处置提供理论依据和数据支撑。下面分别以关山梁滑坡和深弯沟泥石流为例来展现无人机航测技术在单体地

质灾害隐患识别与调查中的应用优势。

关山梁滑坡: 基于无人机航测成果(图 9), 对关山梁滑坡灾害特征及潜在危害进行快速解译与评估。结果显示: 滑坡在降雨作用下产生了整体滑动破坏, 后缘与两侧边界均发育有明显的下错陡坎, 周界清晰, 从 DEM 数字高程数据可直接读取滑坡前后缘高差 55.9 m、坡度 31.6°、滑向 272°等信息; 滑坡三维实景数据显示, 滑坡后缘发育有拉裂缝, 局部仍存有垮塌迹象, 滑坡前缘滑体有渗水迹象, 滑坡现状处于欠稳定状态, 后期强降雨条件下滑坡仍有整体滑动的可能性; 滑坡前缘堆积体已掩埋部分公路, 公路靠山侧排水渠已完全遭受破坏, 滑坡同时造成滑坡前缘右侧、后缘左侧以及前缘 6 间民房损毁。依据无人机航测调查识别与分析结果, 结合地质信息研判, 对该滑坡隐患点提出了专群结合监测、应急预案与响应等处置措施建议。

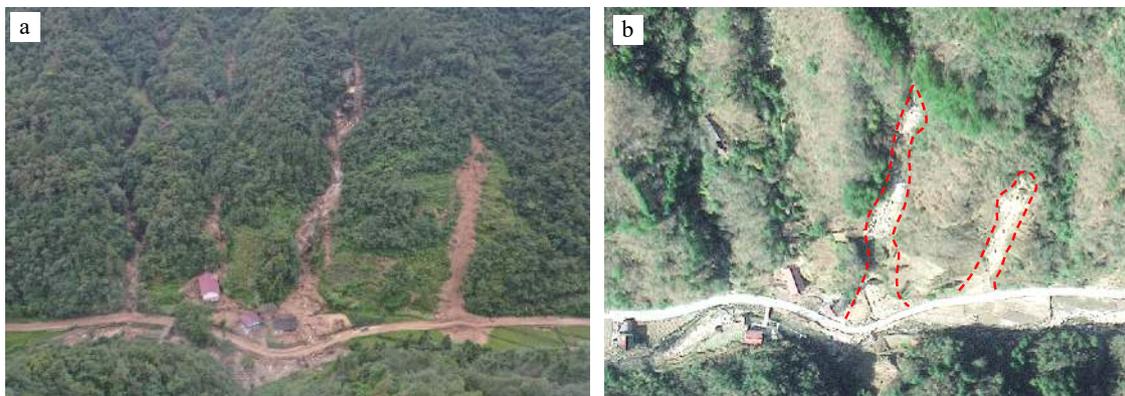
深弯沟泥石流: 通过无人机航测并结合人工地面调查对该泥石流进行了详细调查。经无人机航测数



a.勉县重点区域 InSAR 解译图；b.两河口村滑坡 InSAR 解译图(图 a 中虚线)；
c.两河口村滑坡前光学遥感图；d.两河口村滑坡后光学遥感图

图 7 勉县重点区域及长沟河两河口村滑坡遥感解译图

Fig. 7 Remote sensing interpretation of in key area of Mian county and Lianghekou village landslide in Changgou River area



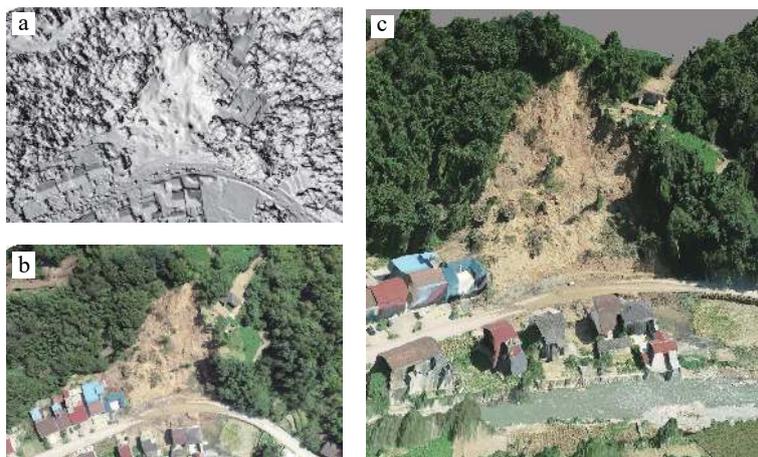
a.无人机拍摄照片；b.光学遥感图

图 8 基于无人机航测和光学遥感技术识别的降雨型泥石流灾害图

Fig. 8 Rainfall induced debris flow disaster identified by the UAV aerial survey and optical remote sensing technologies

据处理得到的深弯沟泥石流全流域正射影像图(图 10),可以清晰地看到泥石流发育的地形地貌及沟

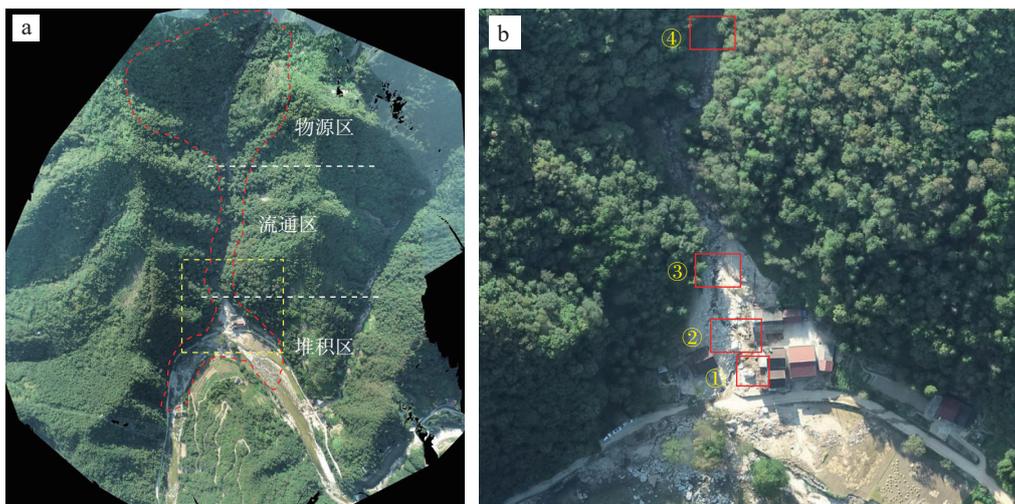
谷。该泥石流发育的地貌类型属中低山沟谷地貌,主沟长为 987 m,沟口高度为 687 m,沟顶高度为 992 m,



a.关山梁滑坡 DSM; b.关山梁滑坡 DOM; c.关山梁滑坡实景三维影像

图 9 关山梁滑坡无人机航测数据图

Fig. 9 UAV aerial survey data of Guanshanliang landslide



a.泥石流流域正射影像图; b.泥石流局部放大图; 图 a 中黄色虚线部分; 图 b 中①、②、③、④的现场照片为图 11 中的 a、b、c、d

图 10 深弯沟泥石流无人机航测成果图

Fig. 10 UAV aerial survey results of Shenwagou debris flow

相对高差为 305 m, 平均纵坡降约为 318 %, 流域面积约为 0.324 km²。沟口扇形宽为 21 m, 长为 121 m, 相对高差为 17 m。此外, 通过人工地面调查进一步验证了无人机航测的成果(图 11)。调查发现物源补给区主要为沟谷两侧不稳定斜坡, 物源主要为节理裂隙发育、破碎的花岗闪长岩基岩及松散堆积物, 流通区主要为 V 字形沟谷, 堆积区为沟口扇形区, 沟口有居民房屋(图 11a), 泥石流堆积物物质组成主要为块石、泥沙(图 11b), 其中块石最大直径约为 6 m(图 11a)。该沟谷沟受“8.22”特大暴雨影响, 于 8 月 22 日凌晨发生泥石流, 本次泥石流发生前共撤离群众 6 户 19 人,

未造成人员伤亡, 但造成沟口 5 间房屋被冲毁, 4 间房屋严重受损。根据无人机航测成果及人工地面调查, 可知该泥石流发育的沟谷坡度较陡且堆积大量的松散堆积物, 在强降雨条件下有可能再次发生大规模泥石流灾害, 因此在汛期应加强对该泥石流沟谷的巡视与监测。

通过灾害实例识别与评估表明, 无人机航测技术在全面评估灾害体精细特征以及潜在影响方面, 具有更加整体、宏观的视角, 同时对局部变形特征迹象的把握更为精准、清晰, 在强降雨诱发地质灾害应急调查、评估研判等方面具有很好的应用前景和优势。



a.块石及受损房屋； b.堆积物； c.沟道； d.流通区沟谷(其位置分别与图10b中的①、②、③、④对应)

图11 深弯沟泥石流地面调查图

Fig. 11 Photos taken from ground investigation of Shenwangou debris flow

5 结论

(1)利用光学遥感、InSAR技术和无人机航测等多源遥感技术手段初步圈定了降雨诱发型地质灾害300处。地质灾害应急调查技术小组对圈定出的地质灾害点进行了现场调查排查,核查后发现多源遥感技术有效识别出了地质灾害212处,有效识别率为70.67%。

(2)多源遥感技术在地质灾害早期识别、应急调查、监测预警和灾后重建等工作中能够发挥重要作用。采用多源遥感技术对强降雨诱发区域性地质灾害应急调查,不仅可以大大减少现场工作时间,而且可以提供全方位、多角度、可视化的高精度遥感成果及信息,提升地质灾害隐患调查识别的有效性。

(3)光学遥感、InSAR、无人机航测等技术都有各自的优势和识别范畴,但单一的调查识别技术手段难以完全有效的解决灾害隐患识别问题。建立一套多种遥感技术手段相互融合、优势互补的综合调查识别技术手段,是强降雨条件下区域性地质灾害快速识别与评价的有效途径。

(4)多源遥感技术的快速发展为地质灾害隐患的调查识别提供了必要的技术支撑,但是传统地面调查与专业人员的经验判断仍是地质灾害隐患识别的不

可获取的技术手段。依托多源遥感+地面调查协同的工作模式,可对地质灾害进行全面调查,最大限度识别出地质灾害隐患点。

参考文献(References):

- 蔡杰华,张路,董杰,等.九寨沟震后滑坡隐患雷达遥感早期识别与形变监测[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(11):1707-1716.
- CAI Jiehua, ZHANG Lu, DONG Jie, et al. Detection and monitoring of post-earthquake landslides in Jiuzhaigou using radar remote sensing[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(11): 1707-1716.
- 戴可人,铁永波,许强,等.高山峡谷区滑坡灾害隐患InSAR早期识别——以雅砻江中段为例[J].雷达学报,2020,9(3):554-568.
- DAI Keren, TIE Yongbo, XU Qiang, et al. Early Identification of Potential Landslide Geohazards in Alpine-canyon Terrain Based on SAR Interferometry: a Case Study of the Middle Section of Yalong River[J]. Journal of Radars, 2020, 9(3): 554-568.
- 丁辉,张茂省,朱卫红,等.黄土滑坡高分辨率遥感影像识别——以陕西省延安市地区为例[J].西北地质,2019,52(03):231-239.
- DING Hui, ZHANG Maosheng, ZHU Weihong, et al. High resolution remote sensing for the identification of loess landslides: example from Yan'an City[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(03): 231-239.

- 董秀军. 三维空间影像技术在地质工程中的综合应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- DONG Xiujun. Research of comprehensive application of three-dimensional image technology in geological engineering[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- 韩海辉, 李健强, 易欢, 等. 遥感技术在西北地质调查中的应用及展望[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 155–169.
- HAN Haihui, LI Jianqiang, YI Huan, et al. Application and prospect of remote sensing technology in geological survey of northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 155–169.
- 黄洁慧, 谢谟文, 王立伟. 基于差分干涉合成孔径雷达技术的米林滑坡形变监测[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(25): 7–12.
- HUANG Jiehui, XIE Mowen, WANG Liwei. The deformation monitoring of Milin landslide based on D-InSAR technology[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(25): 7–12.
- 黄玉华, 武文英, 冯卫, 等. 秦岭山区南秦河流域崩塌地质灾害发育特征及主控因素[J]. 地质通报, 2015, 34(11): 2116–2122.
- HUANG Yuhua, WU Wenying, FENG Wei, et al. Characteristics of main controlling factors of landslide in Nanqin River, Qinling Mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(11): 2116–2122.
- 梁京涛. 高烈度地震区典型地质灾害遥感早期识别及震后演化特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- LIANG Jingtao. Study on the early remote sensing identification and evolution characteristics of typical geological disaster in high intensity earthquake zone[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- 李万林, 周英帅. 基于 D-InSAR 技术的地质灾害和监测预警[J]. 测绘工程, 2021, 30(1): 66–70.
- LI Wanlin, ZHOU Yingshuai. Early warning and monitoring of geohazards based on D-InSAR technology[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2021, 30(1): 66–70.
- 李振洪, 宋闯, 余琛, 等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用: 挑战与对策[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 967–979.
- LI Zhenhong, SONG Chuang, YU Chen, et al. Application of satellite radar remote sensing to landslide detection and monitoring: challenges and solutions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 967–979.
- 李志忠, 孙萍萍, 陈霄燕, 等. 基于卫星遥感技术的绿色发展指标—以中国西部地区为例[J]. 地球科学与环境学报, 2022a, 44(2): 143–155.
- LI Zhizhong, SUN Pingping, CHEN Xiaoyan, et al. Green development index based on satellite remote sensing technology – a case study in the western China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022a, 44(2): 143–155.
- 李志忠, 卫征, 陈霄燕, 等. 新型对地观测技术与地球健康体检[J]. 西北地质, 2022b, 55(02): 56–70.
- LI Zhizhong, WEI Zheng, CHEN Xiaoyan, et al. New earth observation technology and earth health examination[J]. *Northwestern Geology*, 2022b, 55(02): 56–70.
- 李志忠, 杨日红, 党福星, 等. 高光谱遥感卫星技术及其地质应用[J]. 地质通报, 2009, 28(2–3): 270–277.
- LI Zhizhong, YANG Rihong, DANG Fuxing, et al. The hyperspectral remote sensing technology and its application[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(2–3): 270–277.
- 刘星洪, 姚鑫, 於开炳, 等. 川藏高速巴塘—芒康段地质灾害遥感综合早期识别研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(6): 49–60.
- LIU Xinghong, YAO Xin, YU Kaibing, et al. Remote sensing integrated identification of geological hazards in the Batang – Mangkang section of Sichuan – Tibet highway[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(6): 49–60.
- 陆会燕, 李为乐, 许强, 等. 光学遥感与 InSAR 结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(9): 251–261.
- LU Huiyan, LI Weile, XU Qiang, et al. Early Detection of Landslides in the Upstream and Downstream Areas of the Baige Landslide, the Jinsha River Based on Optical Remote Sensing and InSAR Technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 251–261.
- 陆松年, 陈志宏, 李怀坤, 等. 秦岭造山带中—新元古代(早期)地质演化[J]. 地质通报, 2004, 23(2): 107–112.
- LU Songnian, CHEN Zhihong, LI Huaikun, et al. Late Mesoproterozoic-early Neoproterozoic evolution of the Qinling orogeny[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(2): 107–112.
- 宁奎斌, 李永红, 何倩, 等. 2000–2016 年陕西省地质灾害时空分布规律及变化趋势[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(1): 93–101.
- NING Kuibin, LI Yonghong, HE Qian, et al. The spatial and temporal distribution and trend of geological disaster in Shaanxi Province from 2000 to 2016[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(1): 93–101.
- 苏晓军, 张毅, 贾俊, 等. 基于 InSAR 技术的秦岭南部略阳县潜在滑坡灾害识别研究[J]. 山地学报, 2021, 39(1): 59–70.
- SU Xiaojun, ZHANG Yi, JIA Jun, et al. InSAR-based monitoring and identification of potential landslides in Lueyang County, the Southern Qinling Mountains, China[J]. *Mountain Research*, 2021, 39(1): 59–70.
- 王东升, 王宗起, 庞绪勇, 等. 陕西勉略宁地区铜厂湾金矿床辉绿岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 矿床地质, 2021, 40(1): 1–18.
- WANG Dongsheng, WANG Zongqi, PANG Xuyong, et al. Geochronology and geochemistry of diabase veins from Tongchangwan gold deposit in Mianlueing area of Shaanxi Province and

- its tectonic significance[J]. *Mineral Deposits*, 2021, 40(1): 1–18.
- 王绚, 范宣梅, 杨帆, 等. 植被茂密山区地质灾害遥感解译方法研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(11): 1771–1781.
- WANG Xuan, FAN Xuanmei, YANG Fan, et al. Remote Sensing Interpretation Method of Geological Hazards in Lush Mountainous Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1771–1781.
- 王志一, 徐素宁, 王娜, 等. 高分辨率光学和 SAR 遥感影像在地震地质灾害调查中的应用——以九寨沟 M7.0 级地震为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(5): 81–88.
- WANG Zhiyi, XU Suning, WANG Na, et al. Application of the high resolution optical and SAR remote sensing data images induced by the Jiuzhaigou M7.0 earthquake geological hazards survey[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(5): 81–88.
- 许强. 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)*, 2020, 45(11): 1651–1659.
- XU Qiang. Understanding and consideration of related issues in early identification of potential geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1651–1659.
- 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(7): 957–966.
- XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 957–966.
- 杨燕, 杜甘霖, 曹起铜. 无人机航测技术在地质灾害应急测绘中的研究与应用——以 9.28 丽水山体滑坡应急测绘为例[J]. *测绘通报*, 2017, (Z1): 119–122.
- YANG Yan, DU Ganlin, CAO Qitong. Application of UAV aerial surveying technology in geological disaster emergency mapping[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017, (Z1): 119–122.
- 姚鑫, 凌盛, 李凌婧, 等. 中巴经济走廊喀喇昆仑山区段蠕滑滑坡 InSAR 识别研究[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(Z1): 1283–1289.
- YAO Xin, LING Sheng, LI Lingjing, et al. Study of slow-moving landslide recognition by InSAR in the Karakoram Mountain section of China-Pakistan economic corridor[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(Z1): 1283–1289.
- 叶伟林, 宿星, 魏万鸿, 等. 无人机航测系统在滑坡应急中的应用[J]. *测绘通报*, 2017, (9): 70–74.
- YE Weilin, SU Xing, WEI Wanhong, et al. Application of UAV aerial photograph system in emergency rescue and relief for landslide[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017, (9): 70–74.
- 张茂省, 贾俊, 王毅, 等. 基于人工智能(AI)的地质灾害防控体系建设[J]. *西北地质*, 2019, 52(02): 103–116.
- ZHANG Maosheng, JIA Jun WANG Yi, et al. Construction of geological disaster prevention and control system based on AI[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(02): 103–116.
- 张茂省, 雷学武, 校培喜, 等. 遥感技术在黄土高原区地质灾害详细调查中的应用[J]. *西北地质*, 2007, 40(03): 92–97.
- ZHANG Maosheng, LEI Xuewu, XIAO Peixi, et al. Application of remote sensing in detailed survey of geological hazards in Loess Plateau[J]. *Northwestern Geology*, 2007, 40(03): 92–97.
- Dai Keren, Xu Qiang, Li Zhenhong, et al. Post-disaster assessment of 2017 catastrophic Xinmo landslide (China) by spaceborne SAR interferometry[J]. *Landslides*, 2019, 16: 1189–1199.
- Dong Jie, Liao Mingsheng, Xu Qiang, et al. Detection and displacement characterization of landslides using multi-temporal satellite SAR interferometry: A case study of Danba County in the Dadu River Basin[J]. *Engineering Geology*, 2018, 240: 95–109.
- Hu Sheng, Qiu Haijun, Pei Yanqian, et al. Digital terrain analysis of a landslide on the loess tableland using high-resolution topography data[J]. *Landslides*, 2019, 16: 617–632.
- Li Minghua, Zhang Lu, Dong Jie, et al. Characterization of pre- and post-failure displacements of the Huangnibazi landslide in Li County with multi-source satellite observations[J]. *Engineering Geology*, 2019, 257: 105140.
- Meng Qingkai, Li Weile, Raspini Federico, et al. Time-series analysis of the evolution of large-scale loess landslides using InSAR and UAV photogrammetry techniques: a case study in Hongheyan, Gansu Province, Northwest China[J]. *Landslides*, 2021, 18: 251–261.
- Tang C, Zhu J, Li WL, et al. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2009, 68(2): 187–194.
- Xu Qiang, Peng Dalei, Zhang Shuai, et al. Successful implementations of a real-time and intelligent early warning system for loess landslides on the Heifangtai terrace, China[J]. *Engineering Geology*, 2020, 278: 105817.