

引文格式:董秀军,邓博,袁飞云,等.航空遥感在地质灾害领域的应用:现状与展望[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(12):1897-1913.DOI:10.13203/j.whugis20220151



Citation: DONG Xiujun, DENG Bo, YUAN Feiyun, et al. Application of Aerial Remote Sensing in Geological Hazards: Current Situation and Prospects[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(12): 1897-1913. DOI: 10.13203/j.whugis20220151

航空遥感在地质灾害领域的应用:现状与展望

董秀军¹ 邓博¹ 袁飞云² 付霞² 张文居² 巨袁臻¹ 任晓虎³

¹ 成都理工大学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

² 四川藏区高速公路有限责任公司,四川 成都,610041

³ 重庆地质矿产研究院,重庆,401120

摘要:通过地质调查提前了解地质灾害发生的历史和现状,对最终实现潜在灾害的识别和预警具有重要意义。目前,传统人工地面调查手段难以发现并查明茂密植被覆盖或地形高陡等复杂山区的重大地质灾害及隐患,而航空遥感作为一种多功能综合性探测技术,因其独特视角、不受地面条件限制等优势可高效地获取地质灾害发育分布特征和时空演化规律。首先,概述了地质灾害领域常用的航空遥感平台类型及发展趋势,分析了不同荷载传感器信息处理技术优势及主要解决的地质灾害问题。其次,综述了航空遥感技术在地质灾害基础地形测绘、早期识别、调查评价、中长期监测、应急处置5个应用阶段的重点研究成果,并论述了不同阶段的各类技术要求及优劣性。最后,总结航空遥感技术在地质灾害领域应用研究的不足之处,并阐明了未来发展趋势和建议。

关键词:地质灾害;航空遥感;机载激光雷达;无人机;摄影测量

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2022-09-05

DOI:10.13203/j.whugis20220151

文章编号:1671-8860(2023)12-1897-17

Application of Aerial Remote Sensing in Geological Hazards: Current Situation and Prospects

DONG Xiujun¹ DENG Bo¹ YUAN Feiyun² FU Xia² ZHANG Wenju²
JU Yuanzhen¹ REN Xiaohu³

¹ State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

² Sichuan Tibetan Area Expressway Co. Ltd, Chengdu 610041, China

³ Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 401120, China

Abstract: Geological disasters affect every continent with a large population, especially in mountainous countries or regions, and its disasters are obviously high, hidden and sudden. Knowing the history and status of disasters in advance through geological surveys is of great significance for the final realization of potential disaster identification and early warning. At present, it is difficult for traditional artificial ground survey methods to discover and identify major geological hazards and hidden dangers in complex mountainous areas such as dense vegetation coverage or high and steep terrain. As a multi-functional comprehensive detection technology, aerial remote sensing can efficiently obtain the development and distribution characteristics of geological hazards and the temporal and spatial evolution laws due to its unique field of view and not being restricted by ground conditions. First, we summarize the types and development trends of aerial remote sensing platforms commonly used in the field of geological disasters, and analyze the advantages of different load sensor information processing technologies and the main problems of geological disasters. Second, the key research achievements of aerial remote sensing technology in five application stages of geological di-

基金项目:国家自然科学基金(42072306,41941019);重庆市规划和自然资源局科技项目(KJ-2021015)。

第一作者:董秀军,高级实验师,博士,主要从事地质灾害空间数据处理与分析研究。dongxiujun@cdu.cn

通讯作者:邓博,博士生。673804496@qq.com

saster basic terrain mapping, early identification, investigation and evaluation, medium and long-term monitoring, and emergency response are reviewed, and the requirements and advantages and disadvantages of various technical methods at different stages are discussed. The shortcomings of the application of aerial remote sensing technology in the field of geological hazards are summarized, and the future development trends and suggestions are clarified.

Key words: geological disaster; aerial remote sensing; airborne LiDAR; UAV; photogrammetry

随着全球气候变暖,地壳活动进入一个相对活跃期,加上重大工程的开工建设等人类活动的影响,世界各国正在遭受前所未有的地质灾害威胁,过去20年内,全球地质灾害造成死亡人数约70.4万人,经济损失达6489.4亿美元(数据来源:国际紧急灾难数据库(2002—2022年))。近几年来发生的大型地质灾害,比如2020年印度喀拉拉邦山体滑坡、2019年布隆迪山体滑坡、2017年中国茂县新磨村滑坡等重大灾害事件表明:许多灾害具有明显的高位性、隐蔽性和突发性^[1],致使以专业人员地面调查为主的传统地质灾害排查在一些特殊地区尤其是人迹罕至的复杂山区存在明显不足,难以满足“实施灾害风险调查和重点隐患排查工程,掌握风险隐患底数”(2018年中央财经委员会第三次会议^[2])的新时代社会发展需求。随着航空遥感平台及传感器蓬勃发展,无人机倾斜摄影、机载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)等新兴的航空遥感技术正在彻底改变这种依靠人工实地调查、耗时且危险的地质灾害调查方式。

在过去的十几年中,地面遥感观测及卫星技术的发展已经提高了空间分辨率、时效性和描述地质灾害空间形态特征的能力^[3-4],但在部分应用场景中却显得十分繁琐。广域卫星图像采集可以节省大量时间,但由于其地面分辨率相对较低,对于地质灾害形变破坏特征难以实现精细化调查,另外实时变化的云量加上固定的采样频率可能会限制其时间序列的灾害观测能力^[5];基站式地面观测技术具备全天候作业的优点,但其受地形限制的观测视角难以实现大规模地质灾害调查^[6]。相比于前两者,航空遥感技术具有高时空分辨率、机动灵活、自动化程度高等优点,能够作为卫星遥感和地面观测的有效补充手段。因此,在地质灾害研究中如何充分利用航空遥感技术在灾害发生前尽可能全面识别和发现灾害隐患,并掌握灾害发育分布特征和时空演化规律,为监测预警提供理论基础,成为了防灾减灾的关键。

目前,运用航空遥感技术进行地质灾害调查

分析已有丰富的研究成果,但是由于飞行平台、传感器、灾害类型、应用场景的不同,大量研究零散见于国内外期刊、会议,尚未进行全面、系统梳理。因此,本文一方面尝试汇总当今航空遥感在地质灾害领域诸多应用场景下的重点研究成果;另一方面,在此基础上归纳出不同阶段的各类技术要求、解决的问题及优劣性评价,展望了航空遥感在地质灾害领域各项工作中的发展方向与研究重点。

1 航空遥感技术现状与发展趋势

航空遥感是由航空摄影侦察发展而来的一种多功能综合性探测技术,近年来被广泛应用于大面积地形测绘和局域地质灾害详查。欧洲一项大型问卷调查表明:83%的研究者将航空遥感等技术用于滑坡识别、编目和监测,75%的研究者使用两种或两种以上遥感技术融合进行滑坡等地质灾害的研究^[7]。而航空遥感技术在地灾领域的独特优势离不开飞行平台、载荷传感器与遥感信息处理技术的发展与进步。

1.1 航空平台

航空遥感平台包括载人飞行平台和无人机平台。在载人飞行平台方面,以美国为代表的欧美发达国家,技术推进较早,截至2020年,最大保有量的美国生产通用飞机20万架,近5年,中国通用飞机也提升了39.6%。能够搭载高性能激光雷达、航空物探设备等大载重传感器的有人飞行平台蓬勃发展,提升了航空遥感在地灾领域的适用范围与飞行效率。相比于前者,无人机经济成本更低,且保障了操作者的人身安全,适合执行高山峡谷等危险性高的场地飞行任务。随着以大疆无人机、三维机器人等厂商为代表的民用无人机行业近年来迅猛发展,无人机在数量和种类上也处于井喷时期,截至2020年,全球民用无人机出货量达到1131.5万架,同比增长97.0%。

无人机机动性能不断增强,使得其能够适应高差大、信号弱等复杂灾区条件下的高空作业,主要表现在无人机续航时间延长、无人机的载重能

力提升、无人机智能化自主避障水平提高 3 个方面。

1.2 载荷传感器与信息处理技术

载荷传感器是搭载于航空遥感平台上的各种数据采集设备,主要包括视频摄像机、红外探测器、成像光谱仪、合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)、航空磁力仪等,但以光学相机、LiDAR 两种传感器在地灾领域的应用最为集中。随着电子技术的飞速发展以及新型传感器的不断出现,遥感载荷微型化、集成化、模块化、一体化的发展趋势明显。

在光学影像处理技术方面,航空摄影测量是最常用的光学影像处理手段,其发展至今可以概括为 3 个阶段,即传统垂直航空摄影测量、倾斜摄影测量和贴近摄影测量。最早采用单镜头相机垂直对地观测获得影像数据,经空三解算等立体相对成像技术可得到测区正射影像图(digital orthophoto map, DOM)和数字表面模型(digital surface model, DSM);随着多视立体航空摄影技术兴起,航空摄影模式开始变为多镜头相机进行垂直、倾斜等不同角度的集成观测,可快速制作带有真实纹理信息的厘米级地质灾害三维几何模型;随后,由武汉大学张祖勋院士团队提出了一种通过贴近被测物体表面而不断调整拍摄角度的贴近摄影测量技术^[8]。这种摄影方式可以有效获取毫米级三维几何信息,特别适合于陡立危岩体等复杂物体的精细化三维建模。

在 LiDAR 处理技术方面,主要处理流程包括数据定位定向系统(position and orientation system, POS)解算、正射校正、噪点滤波、激光点分类等。目前,国际上已研制出一些较为成熟的激光点云后处理软件,例如 TerraSolid、Lastools 等,它们提供了大量处理算法模块和人机交互式窗口供用户选择,使用者能进行更贴合实际的数据修正。许多学者基于上述软件创建了适合不同场景的点云分类宏命令^[9-10]。通过滤波分类算法可以有效去除地表植被的点云,获取真地面高程数据信息。由此,机载 LiDAR 技术在植被覆盖率较高的山区得到了集中应用。

在 SAR 处理技术方面,根据载体可将其分为机载 SAR、星载 SAR、地基 SAR,相比于后两者,机载 SAR 更加灵活且成像分辨率高,适合执行突发型、中小范围的高精度遥感测绘任务。目前最常用的成像处理方法是距离多普勒算法^[11],但受大气湍流影响,机载 SAR 航线会偏离理想直线轨迹,导致成像散焦,因此一系列运动补偿算法和自聚焦算法应运而生^[12],能够将地灾场景中的 SAR 成像分辨率提高到亚米级。SAR 成像作为主动相干微波传感技术,无须依赖太阳光源,同时低频微波谱段可以避免云雾遮盖及降雨影响,具备了全天候观测能力,为灾害时间序列监测提供重要手段。

常用的航空遥感平台、荷载传感器及地灾应用场景如图 1 所示。



图 1 地质灾害领域常用的航空遥感平台及荷载传感器

Fig. 1 Aerial Remote Sensing Platforms and Load Sensors Commonly Used in the Field of Geological Disasters

2 地质灾害航空遥感应用

2.1 基础地质测绘

随着测绘技术的飞速发展,传统的地面单点定位测量技术日益发展成熟,但是在高陡山区进行精细地形测量却经常遇到困难^[13]。而遥感技术因其具有不受地面条件限制、高时空分辨率等特点,能够极大程度提高基础地质测绘效率及精度。相比于卫星遥感,航空遥感由于其飞行高度相对较低,获取的航片影像时空分辨率高,更适合大比例尺地形测绘,目前已成为基础地理数据采集的最有效手段之一^[14],特别是近几年取得了许多举世瞩目的成就。比如2020年5月,国家自然资源部第一大地测量队综合运用多种现代测绘技术完成了世界第一高峰珠穆朗玛峰的第三次高度精确测量工作,其中由“航空地质一号”特种飞机完成了航空重力和遥感综合测量工作,可将珠峰地区大地水准面精度从米级提高到厘米级^[15];2007—2020年,在零下低温、暴风暴雪等极端天气条件下,中国南极考察队先后使用了18次无人机设备进行了南极野外考察的路线导航、测绘制图、航拍观测、航磁物探等工作^[16],获取了大量宝贵的科研数据;2021年,意大利国家地球物理与火山研究所利用前后两期机载激光雷达与立体卫星图像数据,精确计算了欧洲海拔最高的埃特纳活火山在10 a内喷发的地形变化测图^[17]。

无人机摄影测量技术具有全天候、实时化、大比例尺成图等特点,在广域三维地理信息测图方面展现巨大发展潜力。2019-06,国家自然资源部印发了《自然资源“十四五”规划编制工作方案》,提出未来将大力推进实景三维中国建设。无人机免相控测图技术的推广与应用大大减少了传统摄影测量需要布设像控点的繁琐操作,使得无人机能够完成1:500比例尺精度下的快速成图^[18],为实景三维空间建模工程提供新的技术手段。同时,一系列成熟的三维立体成图与信息管理软件也应运而生,比如清华三维EPS、南方测绘Cass、Pix4D Mapper、Enterprise-Grade Drone等。另外,在飞行作业方式上,为了提高飞行效率,通常采用固定翼无人机进行定高飞行,这就导致了一些地形起伏较大测区由于无人机相对实际地面高度不同,造成高处与低处的重叠度不够,出现山顶漏洞、局部拉花等情况。随着航空遥感平台巡航时间的不断增加,一种采用在垂直方向上进行变高飞行,使其与地面保持相对高度

不变的仿地飞行技术进入人们的视野,该飞行方式使得无人机能够适用不同的地形,保持地面分辨率一致,从而获取更好的数据精度和效果,适合于单体灾害三维精细化地形测图或局部高陡危岩山区“漏洞”的填补修复^[19-20]。

机载SAR三维地形测图主要是运用雷达干涉测量进行的时间测距成像,由于其在云上飞行,具备在各类复杂天气状况下对目标场景进行全天候观测的能力,因此利用无人机搭载的微小型SAR成为多云雾测绘困难地区测图的重要手段,比如,文献[21]利用机载毫米波合成孔径雷达干涉测量系统(interferometric synthetic aperture radar, InSAR),实现了0.3 m分辨率的SAR图像获取和地形测绘,解决了中国多云多雨的云、贵、川地区遥感数据定期、及时获取的难题,助力该区域国土测绘、自然资源调查等应用。

机载LiDAR三维地理建模主要是运用激光雷达发射多束激光,并通过位置、径向速度及物体反射特性等信息来识别目标。尽管无人机摄影测量与卫星遥感技术生成的亚米级分辨率影像已经能够满足大部分地区三维建模及测图需求,但是在茂密植被山区的真实地形三维测图工作中,机载LiDAR展现了独特优势^[22-23]。随着各行业对高精度地理数据的需求不断增加,各国政府也开始进行有组织的全域机载LiDAR数据获取计划。其中以美国地质调查局的三维高程计划为代表,提出了到2023年底要全面获取覆盖美国本土的两级激光雷达等三维数据,该计划解决了美国激光雷达成果质量标准存在差异、数据重复采集、大范围地形资料缺失等问题;2020年全国政协委员许强教授也在中国人民政治协商会议上提出了“全域激光雷达计划”的提案。

另外,随着LiDAR硬件技术的发展,点云密度越来越高,同时也带来了传统测绘与地质测绘的矛盾。比如目前机载LiDAR点云数据获取的规范都是基于地形测绘目的编制的,仅说明了不同比例尺条件下满足数字高程模型(digital elevation model, DEM)网格构建的点云密度要求,而在灾害场地数据采集过程中,操作人员难以评估不同植被密度条件下能够实际获取的地面点云数量是否满足插值要求,需要进行室内点云分类后才能进行验证,操作过程繁琐。为此,笔者通过研究发现,可以划分林分郁闭度与实际点云采集密度大小之间的对应关系,进而根据调查比例尺要求而获取不同精度的数字地形产品,以满足

最佳测图效果,避免了不同场区作业采集点云密度过高或过低的情况。目前该对应规则已发布于《四川地质灾害调查机载激光雷达数据获取技术规范》(DB51/T 2695—2020),在中国西南地区具有良好适用性。

2.2 地质灾害隐患识别

地质灾害发育是一个极为复杂的物理演化过程,加上其形成条件、地质过程和诱发因素的复杂多样性和随机性,高山峡谷、植被茂密的复杂山区地质灾害隐患人工排查存在诸多不足。近年来,卫星光学遥感、星载 SAR、无人机遥感等技术在地质灾害早期识别的应用日益广泛。然而,单一使用某种技术手段也存在缺陷。比如,卫星光学遥感影像易受山区云雾遮挡,规模较小的崩滑灾害不易识别,无人机低空摄影林下灾害几乎无法识别,只能获取裸露地表信息。茂密植被影响也会导致 InSAR 差分干涉失相干严重,难于应用。因此,应当融合高精度光学遥感、星载 InSAR、无人机数字摄影测量和机载 LiDAR 等多源传感器构建空地立体观测的技术体系,完成地质灾害综合观测,利用各技术优势分层次从大到小、精度从低到高、工作从粗到细逐步实施,形成地质灾害早期识别的“三查”体系,如图 2 所示^[24]。

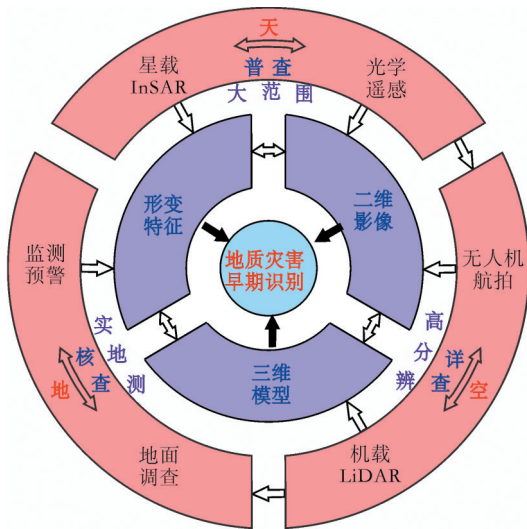


图 2 重大地质灾害早期识别“三查”技术体系^[24]

Fig. 2 Technical System of “Three Investigations” for Early Identification of Major Geological Disasters

在地质灾害早期识别“三查”体系中利用航空遥感主要完成局部重点区域的地质灾害隐患详查,查明历史上的曾经滑动和变形过的古老滑坡、不稳定斜坡、危岩体等。由于不同灾害体在

遥感影像上显示的色调、纹理及几何形态也不尽相同^[25],因此最直观的认识方式就是针对遥感影像特征概化出不同地质模型或灾害现象的解译标志,并形成对应的识别图谱。这种通过构建普适性特征的解译方法尤其适合于地震、暴雨、人类活动等诱发的地质灾害识别^[26-27]。

无人机光学影像常作为卫星遥感的辅助手段为同震灾害的识别制图等提供了有力的数据支撑^[26,28]。另外,随着无人机摄影测量技术的精细化程度越来越高,通过该技术生成的高精度三维实景模型在滑坡、崩塌、危岩体等灾害早期识别效果突出^[29-30],能够清晰获取不稳定斜坡的前期变形征兆,特别是岩壁或坡表中与周围环境有明显灰度纹理差异的形变裂缝^[31]。利用无人机摄影测量技术实现地质灾害早期识别过程如图 3 所示。

机载 LiDAR 能在一定程度上“穿透”植被,获取分米级甚至厘米级的 DEM,从 2000 年开始就被意大利、奥地利、美国等国家先后应用于地质灾害的识别解译^[32-34]。

在中国,香港地区的灾害防治工作取得高度成就,早在 2010 年香港就已经实现了全港机载 LiDAR 的数据采集,2020 年完成了第二次机载 LiDAR 数据获取。过去 10 a,激光雷达被认为对香港独特的地形环境的灾害防治最有效^[35]。香港政府机构以高精度 DEM 地形为基础,采用人工智能与现场调查相结合的方式识别出掩藏在植被层下近 89 000 处疑似滑坡体和微形变地貌形态,并将灾害风险评估结果纳入其滑坡灾害管理与防治体系,大大降低了香港地质灾害造成的危害^[36],成为世界地质灾害管治与城市建设协调的典范。在中国内地,近 3 a 来,主要在四川九寨沟、丹巴、茂县等重点防治区域开展机载 LiDAR 灾害识别解译工作,尤其是在发现历史上的古老滑坡,或曾经活动过但又没有整体滑动以及因地震等强烈作用形成的震裂山体上,取得了很好的效果^[37-38]。利用机载 LiDAR 技术实现地质灾害早期识别过程如图 4 所示。

总体来说,通过三维地形、光谱纹理等不同视角观测,并对照识别特征标志去发现地表裂缝、微地貌形态、松散堆积体、环境变化等灾害物质组成和前期变形征兆是航空遥感技术实现地质灾害早期识别的主要方式。另外,通常要求人工识别出影像地面分辨率的 3 倍以上的疑似灾害区域(面状几何)^[39]。

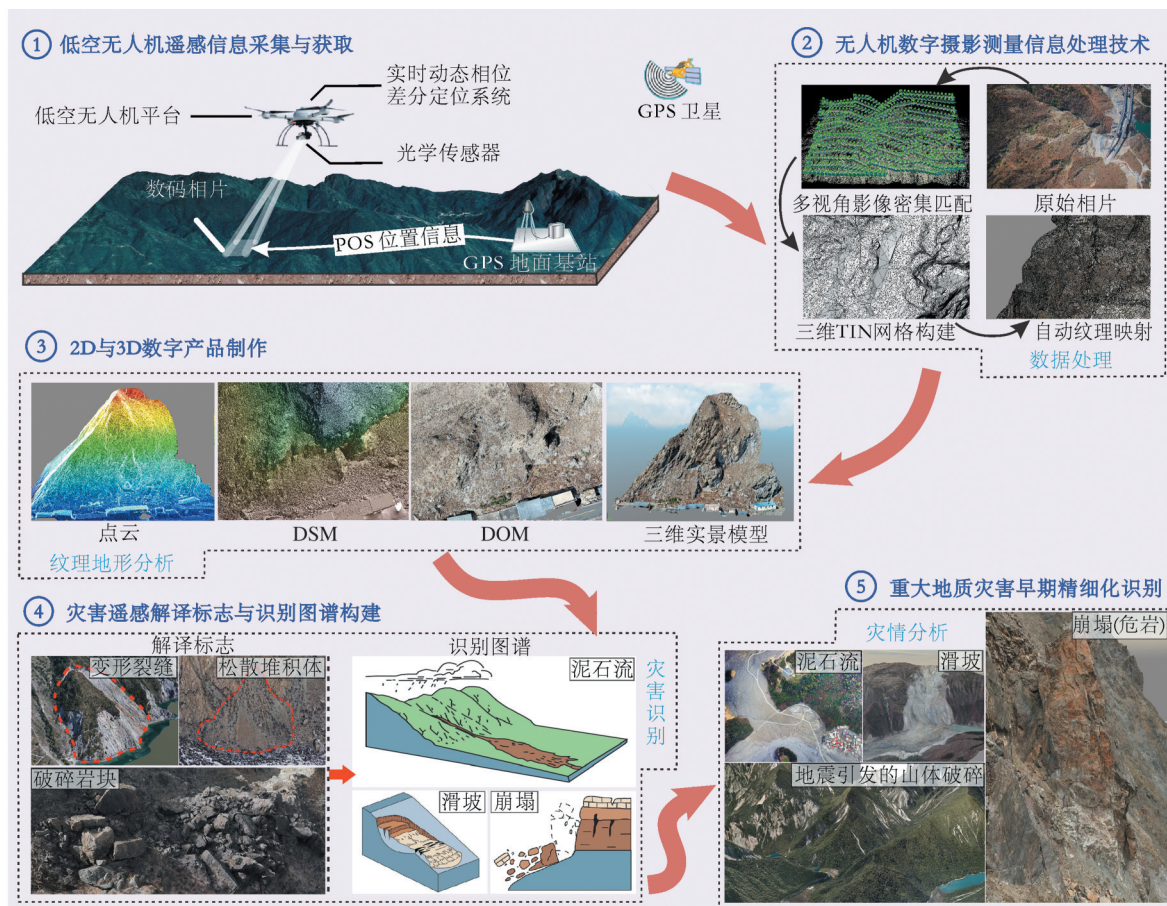


图3 无人机摄影测量数据采集、产品制作及地质灾害早期识别应用

Fig. 3 UAV Photogrammetry Data Collection, Product Production and Early Identification of Geological Hazards

2.3 地质灾害调查与评价

由于不同地质灾害发育背景与形成机制差别很大,为了评估各种灾害发生的可能性大小及威胁程度,地质灾害调查与评价往往需要定性到定量描述不良地质体(或区域)的活动历史、发育特征、物质条件、诱发因素,综合分析并运用合理的物理模型进行稳定性(或失稳概率)计算,最后对失稳可能产生的后果进行模拟和评估。因此调查方式需要多角度、多层次感知地质灾害时空演化特征与分布规律,以达到精细化防控的目的。目前,得益于多种荷载传感器及航空平台的研发,航空遥感技术能够快捷、准确地感知地质体多视角信息,进而成为地质灾害调查与评价的一种重要手段。

从20世纪90年代末开始,许多国家和地区利用机载LiDAR进行滑坡等地质灾害的调查^[40-41],其主要优势是机载LiDAR多回波采集的点云经滤除植被后生成DEM能够清晰地展示灾害体细部几何特征(例如陡坎、松散体、前缘鼓胀等),最早主要采用山体阴影图作为DEM的经典可视化方法,但由于受太阳入射角和高度的影

响,其产生的阴影可能会遮盖部分地貌或减弱地形起伏特征,进而导致地质灾害的漏认或误认。为了拓展DEM数据的可读性,许多学者提出天空视域因子(sky-viewfactors, SVF)、开放度、红色地形图(red relief image map, RRIM)等增强显示可视化方法^[42-44],使用了一种或融合多种从DEM中提取的参数用以表达地形特征,有效解决了单光源使用漫反射情况下的阴影问题,增强地质灾害微地貌特征显示,在滑坡变形裂缝检测、失稳范围圈定、突显滑壁陡坎等实际运用中已取得良好成效^[38, 45-46](见图5)。

相比于机载LiDAR,无人机航空摄影测量是更为经济实惠且实用的航空遥感平台,特别是针对高山峡谷等危险区域的中小型单体地质灾害,无人机有能力到达地面无法到达且有人驾驶飞机难以飞越的区域,不仅能生成厘米级高分辨率影像数据,而且提供了真实的三维实景模型。利用这些直观影像,专业地质人员可以准确地辨识出地质灾害体的形态特征和坡体变形迹象^[47-50](图6(a)),使得无人机已逐渐成为地质灾害调查评价的重要手段和常客^[51]。从广义上讲,无人机

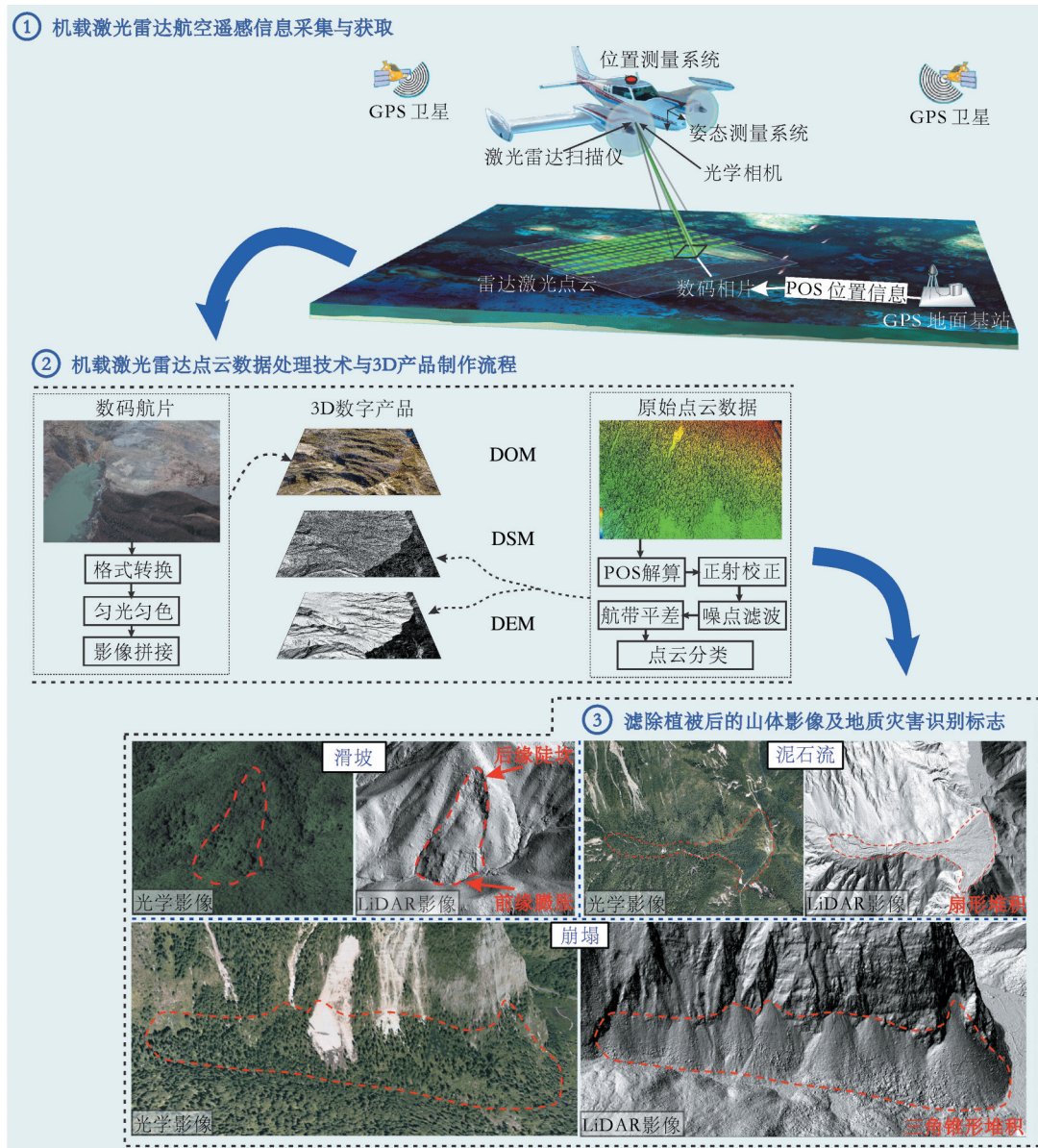


图 4 机载 LiDAR 技术的获取方法、数据结果生成及灾害早期识别应用

Fig. 4 Information Acquisition Method, Data Result Generation, and Disaster Identification Application Based on Airborne LiDAR

摄影测量(可见光)、多光谱探测等光学遥感技术大多适用于地质灾害浅表层的不稳定性特征调查,因为其仅能通过物体表面的色彩纹理进行感知地质环境条件(包括不良地质体所处的地形地貌、地层岩性、破坏特征、植被类型等^[28,52-53]),并以此推测灾害变形破坏机理。另外,大量研究证明,利用光学视觉解译对于灾害的物质运移特征、动态演化状态描述特别有用^[54],因为在灾害事件发生后,物质消耗、运输、沉积区域与未受影响的地形之间的边界通常是不同的^[55],并且可以利用多期的DEM/DSM的差分处理来准确计算并描述这种物质变化的体积和运移方向^[27](见图6(b))。

在岩质边坡结构面特征描述与稳定性评估

方面,利用航空遥感技术主要是通过获取岩体表面的高精度航片或点云数据完成岩体边坡三维数字化信息提取与结构面智能编录,并依次通过围岩质量分级^[56]、三维网络模拟^[57]、块体理论分析^[58]等手段实现岩质边坡的稳定性分析与评价。岩体结构面智能化识别与编录是最主要的研究热点(见图6(c)),其内容主要分为结构面(面状)与迹线(线状)识别。目前,结构面识别主流方法是运用点云作为数据源,利用法向量夹角阈值、K均值、区域生长等算法实现结构面聚类与分组^[59-61],并结合最小二乘法、随机抽样一致算法等平面拟合算法实现结构面三维重构^[62];迹线识别主流方法是利用数字图像,并通过图像黑白灰

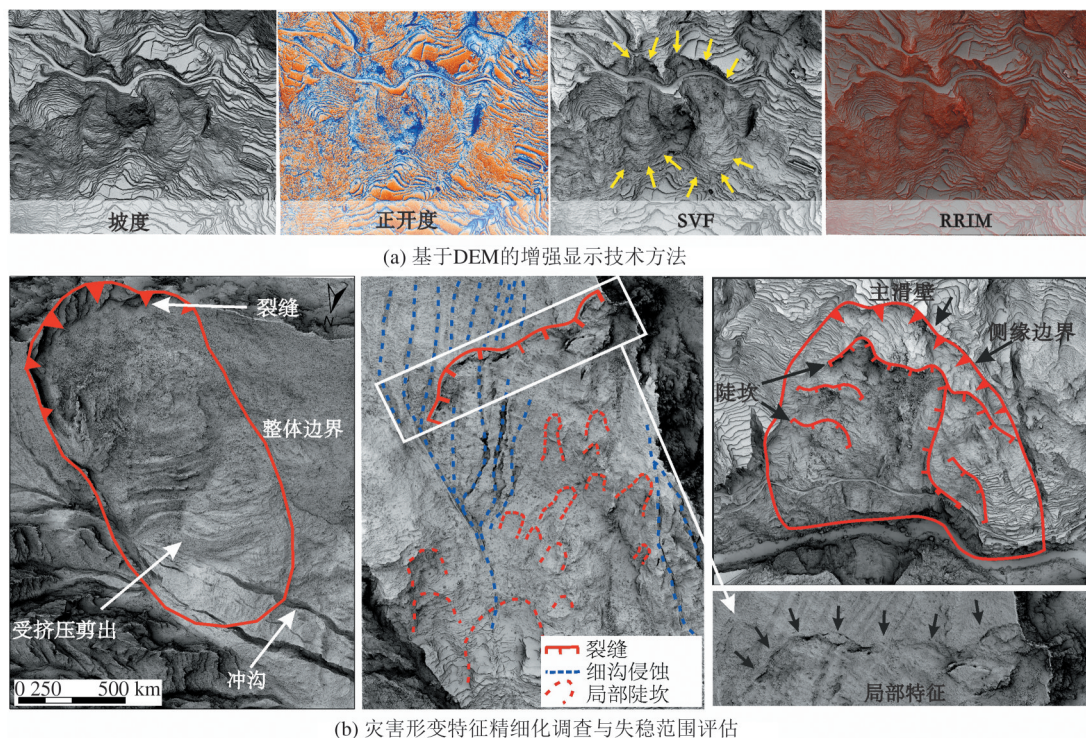
图5 DEM增强显示方法及地质灾害形变精细化调查^[38]

Fig. 5 Enhanced Display Method of DEM and Refined Investigation of Geological Disaster Deformation

度、三原色特征、边缘梯度等阈值分割或机器学习方法完成^[63],然后结合产状、组数、间距、迹长、连通率、粗糙度等^[64]特征描述参数便可实现结构面的智能编录。随着国家重大工程的不断开展,传统地质编录方法难以满足实际效率需求,因此利用航空遥感等技术进行边坡结构信息化采集、智能化处理、快速化评价是未来岩土工程建设的必经之路,在地下隧道工程建设、高陡边坡评估、危岩体调查等场景中具有极大的应用前景。

在地质灾害的区域风险评价方面,基于航空遥感技术的地质灾害识别与制图为风险评价提供了准确的灾害数据库,而且从获得的高分辨率DEM、DOM、实景三维模型中能够衍生出与诱发灾害相关的真实高程、坡度、坡向、坡体结构类型等关键的空间评价基础数据^[65-67](见图7),再结合知识驱动型的专家打分法定性评估或数据驱动型的信息量法、逻辑回归等方法可以进行不同尺度(从区域尺度到单体)的地质灾害定量风险评价^[68-69]。

总体来说,地质灾害调查与评价的最终目的是为防治地质灾害提供科学依据,利用航空遥感技术通过多角度观测灾害表层-内部的形变破坏特征,运用信息化手段实现地质灾害的定性至定量特征描述与评价,能够极大提升灾害防治与工程建设能力。

除上述两种技术以外,光泵磁力仪(氦-4、钪、铯等)能对地磁场强度或梯度进行水平和垂直测量,并反映地下深部不同地质体物理磁场特征,从而能够定量揭示隐患斜坡体地下结构分布特性,实现灾害内部的三维可视化调查^[70-71](见图8)。

热红外成像仪可接收被测目标的红外辐射能量,通过非接触式手段观测物体浅表面的温度分布情况,特别是在灾后人员搜寻、水坝溃决、边坡微裂隙检测等具有明显温差特征的目标检测方面具有独特优势^[72-74](见图9)。

随着“空-天-地-内”潜在不稳定斜坡观测体系的构建与发展,搭载航磁物探、热红外探测仪等航空遥感手段能够重点获取斜坡内部基覆界面和地下水发育变化特征^[75],也逐渐开始应用到地质灾害调查中,在未来具有较大发展潜力。

2.4 地质灾害中长期监测

地质灾害监测是预警的前提,航空遥感主要进行灾害的宏观变形监测,其主要手段是利用同一场景下的多期影像数据进行差分处理,从而获得灾害前后的位移变化情况,从时间序列上达到监测灾害体形变特征的目的。由于地质灾害的发生时间相对于其孕育发展的时间来说非常短暂,在时间尺度上,航空平台层次的地质灾害监测属于中长期监测。

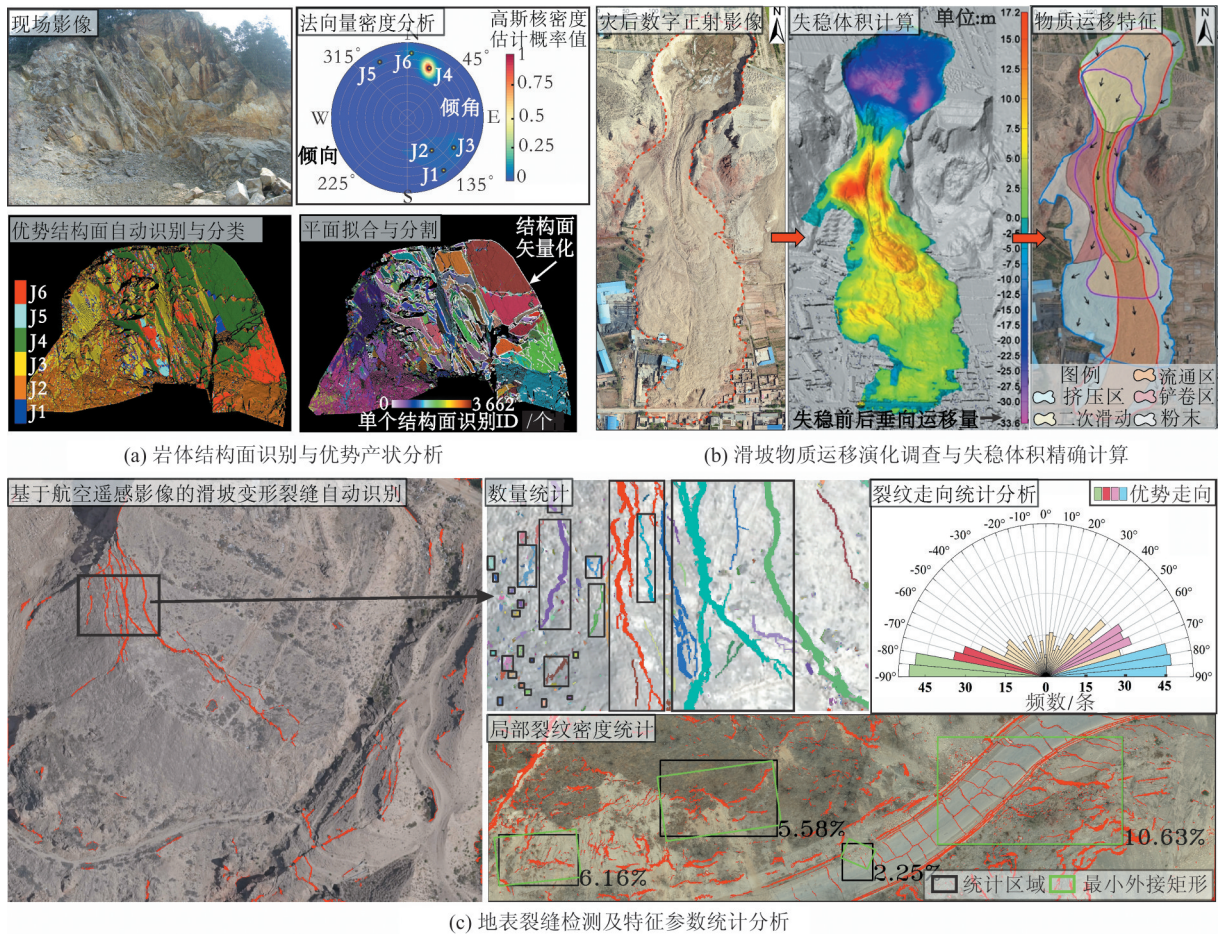


图 6 基于航空遥感信息的灾害失稳特征调查与量化分析评价应用

Fig. 6 Investigation and Quantitative Analysis of Disaster Instability Characteristics Based on Aerial Remote Sensing Information

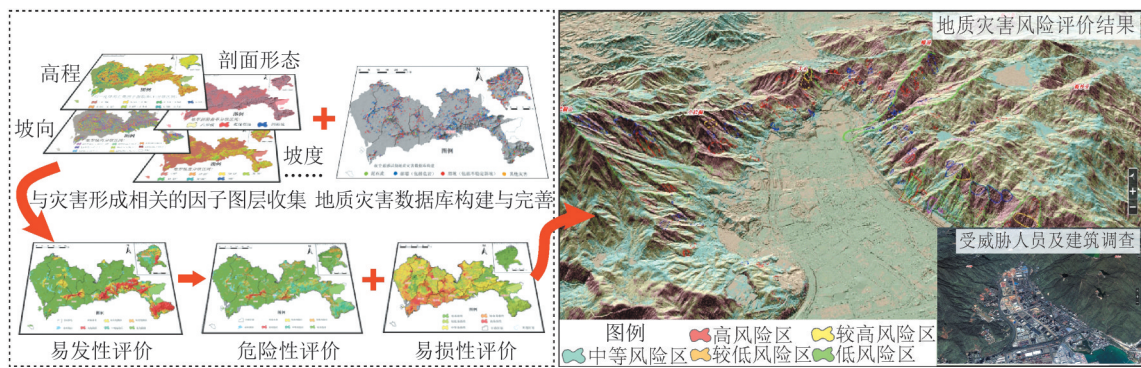


图 7 利用航空遥感获取的 DEM 衍生的地质灾害数据库构建与风险评价

Fig. 7 Construction and Risk Assessment of Aerial Remote Sensing Geological Hazard Database

地质灾害变形监测需要运用 DSM、DEM、点云等能够表达灾害三维特征的数据作为基础,而机载 LiDAR 能够获取厘米级的地面点云精度,常常作为植被茂密山区灾害遥感监测的常用手段。通过多期数据对比能够实现滑坡物质运移表达与位移形变量化监测(见图 10(a)),在多个地区都有成功的案例^[76-77]。结合钻探、物探等现场勘察资料,也可以清晰展示地表位移与地下内部

运动特性,揭示灾害演化规律^[78]。当然,机载 LiDAR 最小可量测的形变量是研究者们最为关心的问题,由于机载 LiDAR 数据往往是大范围连续获取,而不同地形起伏、植被覆盖等差异较大,导致监测数据的准确性和可靠性,大多研究表明目前可靠的最小监测位移大约为 0.1~0.5 m^[79]。

与机载 LiDAR 进行滑坡监测原理类似,对于植被稀疏等黄土地区,无人机平台用于地质灾害

监测已被证明是地基和星载数据之间有效的权衡。最初,人们通过无人机拍摄不同时间的光学图像进行视觉分析和图像解译来分析灾害破坏周期中的变化检测^[56],但这种方式只能完成定性分析。随着倾斜摄影技术的发展,可以通过三维实景模型计算体积^[54]或通过比较多时相DSM来提供三维量化形变监测^[30,41],但由于获取的模型误差较大,需要通过人工选择多期影像数据的同名点或迭代最近点算法等进行影像配准校正^[31],经过配准后的无人机摄影测量进行滑坡的监测误差在5 cm范围内,如图10(b)所示。另外,随着实时动态差分定位技术的逐渐成熟,这种实时的动态定位作业方式能够极大增加无人机三维定位精度,减少了像控点的布设,无须人工校正就能将监测精度提高到厘米级^[80]。

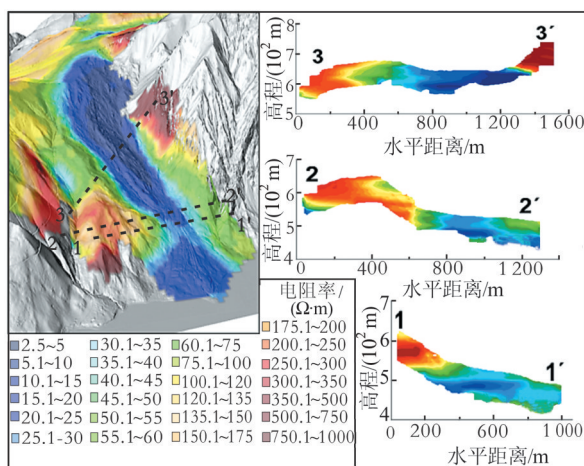


图8 航空电磁探测斜坡地下空间结构^[71]

Fig. 8 Detection of Underground Space Structures Based on Airborne Electromagnetics

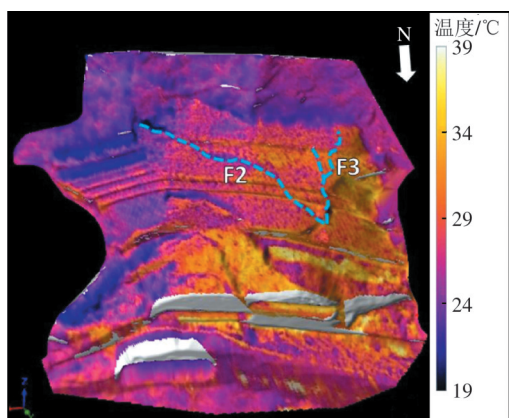


图9 航空红外探测人工边坡微裂隙^[74]

Fig. 9 Infrared Detection of Micro-cracks in Slopes

然而,目前航空遥感数据的多期数据对比研究仍有一些不足之处:(1)数据的可用性仍然是许多机载LiDAR扫描变化检测应用的主要限制。

到目前为止,大多数机载LiDAR扫描变化检测的估计结果仅来自两个时期的观察分析——通常是事件前和事件后的数据集^[55];(2)变化检测结果的不确定性进一步量化也是一个需要进一步关注的领域,因为这对于理解不同时间检测到的地形差异代表的是实际变化还是无关噪声至关重要;(3)目前的研究基本停留在滑坡表面位移的监测,利用表面位移反演滑坡深部位移的研究还相对较少。

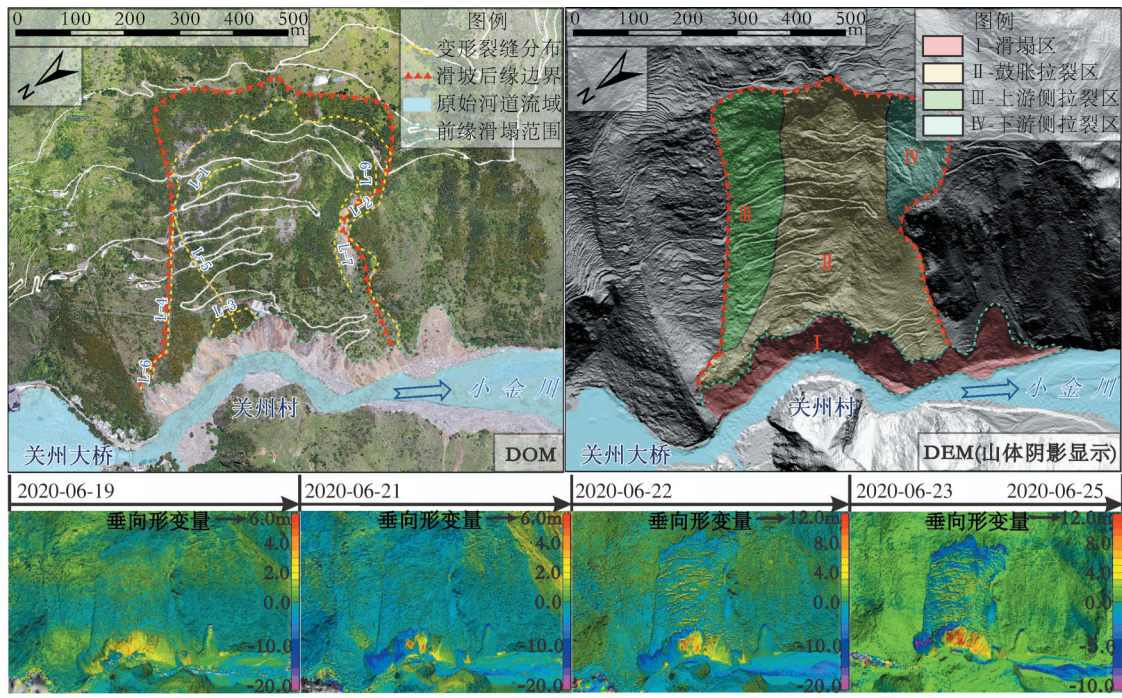
2.5 地质灾害应急处置

对于地质专业人员或部门来说,灾害应急处置需要面对已经出现前兆或突发灾害时,如何在尽量短的时间内查清受灾区域范围、基础设施破坏、潜在威胁对象等基本情况,为迅速救灾应急决策和评估灾害损失提供数据支撑。以往主要依靠人工实地勘测来获取灾害信息,难以保证人身安全;受空间分辨率和运行周期的影响,卫星遥感技术在灾害应急调查中也受到一定限制。20世纪60年代,美国建立了国家、州政府和企业合作的航空遥感应急体系,随后以欧盟为主导和成员国参与的灾害应急和地质调查的航空遥感体系也逐渐在欧洲建立起来,紧接着巴西建立了著名的“保卫亚马逊”计划,推广了航空遥感在环境和灾害应急调查等方面的应用。

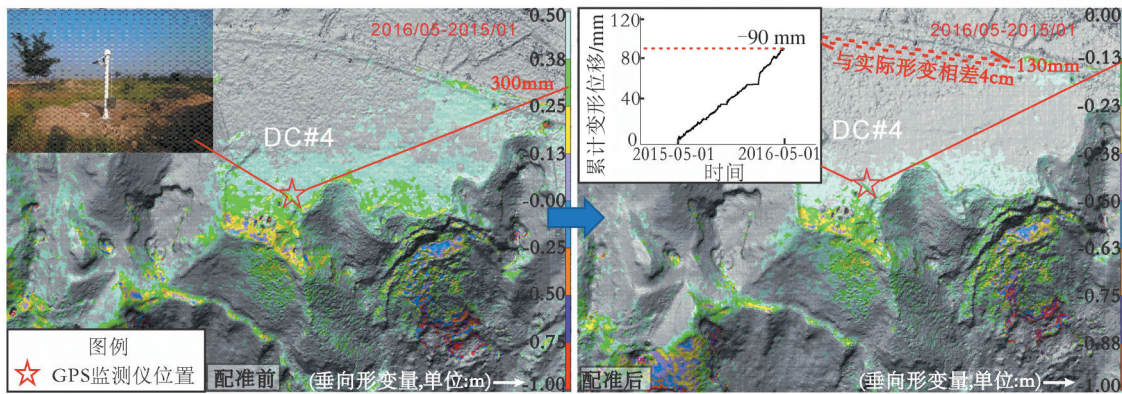
轻小型无人机具有超低空获取数据的能力,能够快速响应航空作业需求,成了单体地质灾害应急处置的首要选择。其作用主要是能够提供现场灾害范围、实景三维地形、建筑破坏、人员存活等情况,为灾害发生前后的人员疏散、交通管制、物质运移、搜救指导、治理设计、潜在威胁预报等方面提供帮助^[1,81-83],近年来在中国2008年汶川地震、2017年茂县新磨村滑坡、贵州纳雍崩塌、2018年白格滑坡应急抢险中都发挥了重要作用。

3 应用展望

在国家经济建设的飞速发展下,资源开发工程建设力度逐渐增大,许多重大工程(例如延安平山造城、交通廊道工程建设等)多面临着如何与地质环境协调问题,需要开展大量复杂的地质灾害调查工作。如前所述,运用航空遥感技术能够高效辅助并实现大部分场景人工调查难以开展的地质灾害识别、调查、监测等诸多工作,这对于航空遥感在地质灾害领域发展而言是一次极好的机遇。结合近年来关键技术研发与实际工



(a) 基于机载LiDAR的阿娘寨滑坡多期DEM数据差分及物质运移变化量化分析



(b) 配准前后无人机摄影测量的黑方台黄土滑坡位移监测及精度验证

图 10 航空遥感在地质灾害中长期监测中的应用实例

Fig.10 Application Example of Aerial Remote Sensing in Medium and Long-Term Monitoring of Geological Disasters

程需求,本文总结了以下几点亟需解决的重点问题与应用发展趋势。

3.1 极端自然条件下的航空硬件开发

目前,无人机市场多以消费级小型无人机为主,工业级航测型无人机也多为光学载荷为主,同时存在低端重复开发、缺乏核心技术等问题。这些无人机平台已很难满足高山峡谷区复杂环境条件下地质灾害调查测绘的实际需求。

民用固定翼无人机难以在较短水平距离下达到理想上升高度,导致高海拔地区的冰崩-碎屑流-堰塞坝的方量估算仍是未知数,而旋翼无人机因耗电量较大,现有电池续航技术难以满足大范围工作需要。另外,为满足多种传感器协同作业,对航空平台的荷载能力也有要求,鉴于无人机在极端复杂环境条件下作业的弊端,有时候只

能依靠价格高昂的有人机航空飞行平台;在大温差、局部强风等复杂环境条件下,极低温环境会导致电池的电量急速衰减,局部强风尤其是侧风对无人机的安全飞行也会构成严重威胁。

因此,研制适用于极端自然条件下且能进行大载荷、长航时的安全可靠工作的航空飞行硬件具有非常迫切的需求。

3.2 无人机自主飞行与实时数据处理

目前,要完成无人机的精细化仿地飞行,需要先获取测区高精度DSM,造成数据获取的时效性较低;其次,在室内或GPS信号不佳的环境下需要构建精确的立体视觉定位功能,由于目前工业级航测无人机市场需求较低,研发费用过高,仅消费级无人机逐步实现了主动探测距离和自主避障能力。然而面向青藏高原、川西高山峡谷

等地形复杂区域地质灾害快速精准勘察量测需求,仍需要研发工业级山地环境自主导航仿地航测系统,其中亟需重点突破的问题主要集中在无人机实时测高、视觉及即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)定位导航、三维航线任务自主规划等方面。

另外,无人机实时数据传输处理技术也非常关键,即在获取数据的同时就开始自动完成信息处理及成果生成,因此亟需研究无人机影像数据实时二维构图、准实时三维建模、多模态数据自动配准、自适应精度建模等关键技术,这将大大提高地质灾害应急抢险的效率,为应急处置的科学研判和决策提供强有力保障。

3.3 多源遥感数据集成与融合

单一的航空遥感技术并不能解决地质灾害领域的所有问题。结合卫星平台的光学遥感和InSAR,以及地面平台的地面调查和监测等技术手段将能够进一步提高防灾减灾能力。比如利用手持激光雷达的SLAM技术对承灾体建筑物进行精细化三维建模,同时结合航空遥感获取的灾害形变信息,运用数值模拟软件完成灾后的建筑物损伤计算,能够为设计建筑结构、灾后人员撤退方案制定提供更精细的科学依据;再比如由于传感器的精度以及地形、天气与影像配准等误差,利用航空遥感技术进行地质灾害的监测目前难以达到InSAR量化毫米级形变的程度,

因此,如何实现航空遥感与卫星、地面等多平台多传感器之间的多源集成与融合应用,利用各技术优势分层次从大到小、精度从低到高、工作从粗到细逐步实施,才能更好地为防灾减灾服务^[23, 84-85]。

3.4 地质灾害智能化识别

在实际生产工程应用中,人工目视解译仍然是目前航空遥感识别地质灾害最常用的方法之一,但是其工作量巨大,耗时费力,且不同操作人员的主观因素过大,导致识别结果往往有差异。因此,结合灾害发育分布特征并利用神经网络、贝叶斯概率、决策树等人工智能算法实现地质灾害的自动识别是未来航空遥感灾害解译的主要发展趋势之一^[86]。

多项研究表明,机器学习方法针对具有明显影像差异的正在变形滑坡能够有较好的识别效果^[87],而对于历史上发生的古老滑坡体,因绝大多数近期内未变形,其光谱特性与周围环境并无明显差异,导致滑坡自动识别难度较大,识别准

确率较低^[88]。另外,目前深度学习在地质灾害隐患识别中的数据源主要为卫星光学影像,利用机载LiDAR厘米级DEM或点云数据结合深度学习的灾害隐患识别鲜有研究^[89];目前大多数研究都是针对特定地区或地貌条件进行的灾害智能识别,模型泛化能力不强,不适用于大范围灾害自动检测识别;对于岩体结构面或者其他地质要素的自动提取主要依赖于阈值设定,使得操作的通用性不强,不同研究区域需要摸索不同的阈值,自动化程度不高;某些软件内嵌的机器学习算法由于其训练样本量小,会出现过拟合现象,导致新测区提取精度较低,适用性较差。

综上所述,地质灾害智能识别亟需重点突破问题主要体现在:(1)地质灾害多源样本库的体系构建与数据收集;(2)符合地灾特性的深度学习理论框架算法研究;(3)构建复杂场区岩体结构面识别的自适应参数设定与自动化信息处理。

3.5 航空遥感地灾专业分析软件集成与开发

目前遥感数据分析处理基本使用的都是来自国外的通用商业软件,如ERDAS IMAGINE、ArcGIS、ENVI等。(1)这些软件主要以满足测绘需要为目的,可能将对地质灾害调查评价异常重要的反映岩体结构特征和变形特征的“细节”光滑和粗化掉,只保留宏观地形信息;(2)软件处理数据均以光学、高光谱、多光谱等遥感影像为主,对机载LiDAR获取的激光点云、实景三维模型、InSAR数据成果,地质灾害相关的矢量及专题图件很难集成融合展示;(3)这类地理信息系统软件对海量数据的三维高精度可视化能力较弱,难以进行多视角人工交互式解译与分析。

因此,亟需研究开发能够兼容“天-空-地-内”多元立体观测技术获取的海量空间异构数据,在完成三维可视化展示的同时还具备地质灾害解译、地形增强渲染及地质信息提取等功能的一套专业地灾分析软件,以此提高地质灾害调查评价和灾害隐患早期识别的专业化水平和效率。

参 考 文 献

- [1] Xu Qiang, Li Weile, Dong Xiujun, et al. The Xinmou Landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: Characteristics and Failure Mechanism [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(11): 2612-2628. (许强, 李为乐, 董秀军, 等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(11): 2612-2628.)

- [2] The Website of the Central People's Government of the People's Republic of China. Xi Jinping Presided over the Third Meeting of the Central Financial and Economic Commission [EB/OL]. (2018-10-10) [2022-03-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2018-10/10/content_5329292.htm?tdsourcetag=s_pcqq_aiomsg. (中华人民共和国中央人民政府网. 习近平主持召开中央财经委员会第三次会议[EB/OL]. (2018-10-10) [2022-03-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2018-10/10/content_5329292.htm?tdsourcetag=s_pcqq_aiomsg.)
- [3] Yang Maowei. Application of 3D Laser Scanner in Topographic Mapping of Geological Hazards [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(5): 145-146. (杨茂伟. 三维激光扫描仪在地质灾害地形测绘中的应用[J]. 测绘通报, 2016(5): 145-146.)
- [4] Deng Hui. Application on Investigation and Evaluation of Geohazard by High-Precision Satellite Remote Sensing Technique [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007. (邓辉. 高精度卫星遥感技术在地质灾害调查与评价中的应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.)
- [5] Liang Feng. The Identification of Typical Geohazards in Sichuan Steep Mountainous Based on Remote Sensing Technology and Deep Learning Technology [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021. (梁峰. 基于遥感技术与深度学习的四川高陡山区典型地质灾害识别[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.)
- [6] Dong Xiujun. The Three-Dimensional Laser Scanning Technique and Research on Its Engineering Application [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007. (董秀军. 三维激光扫描技术及其工程应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.)
- [7] Tofani V, Segoni S, Agostini A, et al. Technical Note: Use of Remote Sensing for Landslide Studies in Europe [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, 13(2): 299-309.
- [8] Yan Si. The Birth of the Third Photogrammetry Method [N]. China Natural Resources News, 2019-11-11(005). (言司. 第三种摄影测量方式的诞生 [N]. 中国自然资源报, 2019-11-11(005).)
- [9] Sithole G, Vosselman G. Experimental Comparison of Filter Algorithms for Bare-Earth Extraction from Airborne Laser Scanning Point Clouds [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2004, 59(1/2): 85-101.
- [10] Sun Kai, Xue Xiaoxuan, Xu Kai. Discussion on the Method of DEM Generation Using Airborne LiDAR Data [J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2018, 41(5): 173-175. (孙凯, 薛晓轩, 徐凯. 应用机载激光雷达数据制作DEM的方法探讨 [J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(5): 173-175.)
- [11] Wang Zhenli, Wang Qun, Ma Rupo, et al. Research on High Resolution SAR Imaging Algorithm Based on Optimal Sampling Length [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2021, 58(22): 278-284. (王振力, 王群, 马如坡, 等. 基于最佳抽样序列长度的高分辨率 SAR 成像算法的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(22): 278-284.)
- [12] Xing Mengdao, Lin Hao, Chen Jianlai, et al. A Review of Imaging Algorithms in Multi-platform-Borne Synthetic Aperture Radar [J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(6): 732-757. (邢孟道, 林浩, 陈溅来, 等. 多平台合成孔径雷达成像算法综述 [J]. 雷达学报, 2019, 8(6): 732-757.)
- [13] Dong Xiujun, Wang Dong, Feng Tao. Research on the Application of Unmanned Aerial Vehicle Digital Photogrammetry in Landslide Disaster Investigation [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2019, 30(3): 77-84. (董秀军, 王栋, 冯涛. 无人机数字摄影测量技术在滑坡灾害调查中的应用研究 [J]. 地质灾害与环境保护, 2019, 30(3): 77-84.)
- [14] Wu Zhiyong. Application of UAV Aerial Photogrammetry Technology in Topographic Mapping [J]. *Engineering and Construction*, 2016, 30(1): 36-37. (吴智勇. 无人机航空摄影测量技术在地形测绘中的应用探析 [J]. 工程与建设, 2016, 30(1): 36-37.)
- [15] Wang Zikun. "China's Geological Survey Air Force" to Measure Mount Everest Above the Cloud [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2020, 32(2): 232. (王自堃. "中国地调空军"云端之上测珠峰 [J]. 国土资源遥感, 2020, 32(2): 232.)
- [16] Li Teng, Zhang Baogang, Cheng Xiao, et al. Applications of UAVs in Antarctic Scientific Research: Progress and Prospect [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(5): 651-664. (李腾, 张宝钢, 程晓, 等. 无人机在南极科学研究的应用: 进展与展望 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(5): 651-664.)
- [17] Bisson M, Spinetti C, Andronico D, et al. Ten Years of Volcanic Activity at Mt Etna: High-Resolution Mapping and Accurate Quantification of the Morphological Changes by Pleiades and LiDAR Data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 102: 102369.
- [18] Zhu Xiaokang, Wei Jingshuai. 1: 500 Image-Free

- UAV Aerial Survey Technology Application Research [J]. *Geospatial Information*, 2019, 17(2): 22-26. (朱晓康, 魏景帅. 1:500免像控无人机航测技术应用研究[J]. 地理空间信息, 2019, 17(2): 22-26.)
- [19] Samar R, Rehman A. Autonomous Terrain-Following for Unmanned Air Vehicles[J]. *Mechatronics*, 2011, 21(5): 844-860.
- [20] Kosari A, Maghsoudi H, Lavaei A, et al. Optimal Online Trajectory Generation for a Flying Robot for Terrain Following Purposes Using Neural Network [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2015, 229(6): 1124-1141.
- [21] Yao Xiuguang, Liu Donglie, Zhang Bin, et al. Application Research and Practice of Airborne Millimeter Wave InSAR System in Sophisticated Terrain and Climate Environment [C]//The 7th Annual Conference on High Resolution Earth Observation, Changsha, China, 2020. (姚秀光, 刘东烈, 张斌, 等. 机载毫米波 InSAR 系统在复杂地形气候环境下应用研究与实践[C]//第七届高分辨率对地观测学术年会, 中国长沙, 2020.)
- [22] Li X J, Cheng X W, Chen W T, et al. Identification of Forested Landslides Using LiDAR Data, Object-Based Image Analysis, and Machine Learning Algorithms[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 9705-9726.
- [23] Görüm T. Landslide Recognition and Mapping in a Mixed Forest Environment from Airborne LiDAR Data [J]. *Engineering Geology*, 2019, 258: 105155.
- [24] 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. (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.)
- [25] Zhu Qing, Zeng Haowei, Ding Yulin, et al. A Review of Major Potential Landslide Hazards Analysis [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(12): 1551-1561. (朱庆, 曾浩炜, 丁雨淋, 等. 重大滑坡隐患分析方法综述[J]. 测绘学报, 2019, 48(12): 1551-1561.)
- [26] Gorum T, Fan X M, van Westen C J, et al. Distribution Pattern of Earthquake-Induced Landslides Triggered by the 12 May 2008 Wenchuan Earthquake [J]. *Geomorphology*, 2011, 133(3/4): 152-167.
- [27] Peng Dalei, Xu Qiang, Dong Xiujun, et al. Accurate and Efficient Method for Loess Landslide Fine Mapping with High Resolution Close-Range Photogrammetry [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(2): 424-435. (彭大雷, 许强, 董秀军, 等. 基于高精度低空摄影测量的黄土滑坡精细测绘[J]. 工程地质学报, 2017, 25(2): 424-435.)
- [28] Valkaniotis S, Papathanassiou G, Ganas A. Mapping an Earthquake-Induced Landslide Based on UAV Imagery: Case Study of the 2015 Okeanos Landslide, Lefkada, Greece[J]. *Engineering Geology*, 2018, 245: 141-152.
- [29] Firpo G, Salvini R, Francioni M, et al. Use of Digital Terrestrial Photogrammetry in Rocky Slope Stability Analysis by Distinct Elements Numerical Methods [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(7): 1045-1054.
- [30] Lucieer A, de Jong S M, Turner D. Mapping Landslide Displacements Using Structure from Motion (SfM) and Image Correlation of Multi-temporal UAV Photography[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2014, 38(1): 97-116.
- [31] Ju Yuanzhen. Early Recognition of Loess Landslide Based on UAV Photogrammetry: A Case Study of Heifang Terrace[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. (巨袁臻. 基于无人机摄影测量技术的黄土滑坡早期识别研究: 以黑方台为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.)
- [32] McKean J, Roering J. Objective Landslide Detection and Surface Morphology Mapping Using High-Resolution Airborne Laser Altimetry [J]. *Geomorphology*, 2004, 57(3/4): 331-351.
- [33] Comert R, Avdan U, Gorum T, et al. Mapping of Shallow Landslides with Object-Based Image Analysis from Unmanned Aerial Vehicle Data [J]. *Engineering Geology*, 2019, 260: 105264.
- [34] Jebur M N, Pradhan B, Tehrany M S. Optimization of Landslide Conditioning Factors Using very High-Resolution Airborne Laser Scanning (LiDAR) Data at Catchment Scale [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 150-165.
- [35] Anthony S, Tony H, Jeff W, et al. Advancing the Use of LiDAR in Geotechnical Applications in Hong Kong: A 10-Year Overview [C]//The 42nd Asian Conference on Remote Sensing, Can Tho, Viet Nam, 2021
- [36] Wang H J, Zhang L M, Luo H Y, et al. AI-Powered Landslide Susceptibility Assessment in Hong Kong [J]. *Engineering Geology*, 2021, 288: 106103.
- [37] Dong Xiujun, Xu Qiang, She Jinxing, et al. Prelimi-

- nary Study on Interpretation of Geological Hazards in Jiuzhaigou Based on Multi-source Remote Sensing Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 432-441. (董秀军, 许强, 余金星, 等. 九寨沟核心区多源遥感数据地质灾害解译初探[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(3): 432-441.)
- [38] Guo C, Xu Q, Dong X J, et al. Geohazard Recognition and Inventory Mapping Using Airborne LiDAR Data in Complex Mountainous Areas[J]. *Journal of Earth Science*, 2021, 32(5): 1079-1091.
- [39] Zheng Xiongwei, Peng Bei, Shang Kun. Assessment of the Interpretation Ability of Domestic Satellites in Geological Remote Sensing[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2021, 33(3): 1-10. (郑雄伟, 彭宇, 尚坤. 基于国产卫星的遥感地质解译能力评估[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(3): 1-10.)
- [40] Baltsavias E P. Airborne Laser Scanning: Basic Relations and Formulas[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54(2/3): 199-214.
- [41] Peternel T, Kumelj Š, Oštir K, et al. Monitoring the Potoška Planina Landslide (NW Slovenia) Using UAV Photogrammetry and Tachymetric Measurements[J]. *Landslides*, 2017, 14(1): 395-406.
- [42] Zakšek K, Oštir K, Kokalj Ž. Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique[J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(2): 398.
- [43] Shirasawa M, Yokoyama R. Visualizing Topography by Openness: A New Application of Image Processing to Digital Elevation Models[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2002, 68: 257-266.
- [44] Chiba T, Kaneta S, Suzuki Y. Red Relief Image Map: New Visualization Method for Three Dimensional Data[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, 37(B2): 1071-1076.
- [45] Xu Q, Guo C, Dong X J, et al. Mapping and Characterizing Displacements of Landslides with InSAR and Airborne LiDAR Technologies: A Case Study of Danba County, Southwest China [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13: 4234.
- [46] Favalli M, Fornaciai A. Visualization and Comparison of DEM-Derived Parameters. Application to Volcanic Areas [J]. *Geomorphology*, 2017, 290: 69-84.
- [47] Jaboyedoff M, Metzger R, Oppikofer T, et al. New Insight Techniques to Analyze Rock-Slope Relief Using DEM and 3D-Imaging Cloud Points [C]// The 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, 2007.
- [48] Dewez T B, Leroux J, Morelli S. Cliff Collapse Hazard from Repeated Multicopter UAV Acquisitions: Return on Experience [J]. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, 41: 805-811.
- [49] Karantanellis E, Marinos V, Papathanassiou G. Multitemporal Landslide Mapping and Quantification of Mass Movement in Red Beach, Santorini Island Using Lidar and UAV Platform [C]//IAEG/AEG Annual Meeting, San Francisco, California, 2018.
- [50] Al-Rawabdeh A, He F N, Moussa A, et al. Using an Unmanned Aerial Vehicle-Based Digital Imaging System to Derive a 3D Point Cloud for Landslide Scarp Recognition [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(2): 95.
- [51] 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. 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.)
- [52] Li W L, Zhao B, Xu Q, et al. Deformation Characteristics and Failure Mechanism of a Reactivated Landslide in Leidashi, Sichuan, China, on August 6, 2019: An Emergency Investigation Report [J]. *Landslides*, 2020, 17(6): 1405-1413.
- [53] Cheng Z, Gong W P, Tang H M, et al. UAV Photogrammetry-Based Remote Sensing and Preliminary Assessment of the Behavior of a Landslide in Guizhou, China [J]. *Engineering Geology*, 2021, 289: 106172.
- [54] van Westen C J, Lulie G F. Analyzing the Evolution of the Tessina Landslide Using Aerial Photographs and Digital Elevation Models [J]. *Geomorphology*, 2003, 54(1/2): 77-89.
- [55] Scaioni M, Longoni L, Melillo V, et al. Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(10): 9600-9652.
- [56] Zhan Wei. Research on Semi-automatic Identification of Rock Mass Cracks and Rapid Evaluation of Tunnel Rock Mass Quality [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020. (詹伟. 岩体裂隙半自动识别及隧道岩体质量快速评价方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.)
- [57] Liu Q, Kaufmann V. Integrated Assessment of Cliff

- Rockfall Hazards by Means of Rock Structure Modelling Applied to TLS Data: New Developments[C]//ISRM Regional Symposium-EUROCK 2015, One-Petro, Salzburg, Austria, 2015.
- [58] Wang Shuhong, Zhang Hang, Zhang Yanqiao, et al. Random Structural Plane Cutting of a Rock Slope Spatial Block Model and Its Key Blocks Analysis[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2011, 32(3): 431-434. (王述红, 张航, 张艳桥, 等. 随机结构面切割岩质边坡空间块体模型及关键块体分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(3): 431-434.)
- [59] Wang Peitao, Qin Tuo, Huang Zhengjun, et al. Fast Identification of Geometric Properties of Rock Discontinuities Based on 3D Point Cloud[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(3): 503-519. (王培涛, 覃拓, 黄正均, 等. 基于三维点云的岩体结构面信息快速识别方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(3): 503-519.)
- [60] Ning Hao. Recognition and Information Extraction of Rock Mass Structural Plane Based on 3D Laser Scanning [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020. (宁浩. 基于三维激光扫描的岩体结构面识别与信息提取[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.)
- [61] Li Yunsheng, Song Jinlong, Li Yu, et al. Partitioning Discontinuities of Rock Mass Based on K -means and Hierarchical Clustering Analysis Algorithms [J]. *Yangtze River*, 2018, 49(6): 44-49. (李运生, 宋金龙, 李煜, 等. 基于凝聚层次聚类的 K 均值结构面产状分组[J]. 人民长江, 2018, 49(6): 44-49.)
- [62] Chen Na. The Structural Information and Deformation Monitoring of Rock Slope Based on 3D Laser Scanning Technology [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (陈娜. 基于三维激光扫描的边坡岩体结构信息提取和变形监测研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.)
- [63] Zhang F, Hu Z Q, Yang K, et al. The Surface Crack Extraction Method Based on Machine Learning of Image and Quantitative Feature Information Acquisition Method[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13: 1534.
- [64] Zheng Jian. Digital Method to Acquire Geometric Parameters of Discontinuity and Research on 3D Network Model [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016. (郑健. 岩体结构面几何参数获取的数字化方法及三维网络模型研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.)
- [65] Riquelme A J, Abellán A, Tomás R, et al. A New Approach for Semi-automatic Rock Mass Joints Recognition from 3D Point Clouds [J]. *Computers and Geosciences*, 2014, 68: 38-52.
- [66] Bostjančič I, Filipović M, Gulam V, et al. Regional-Scale Landslide Susceptibility Mapping Using Limited LiDAR-Based Landslide Inventories for Sisak-Moslavina County, Croatia [J]. *Sustainability*, 2021, 13(8): 4543.
- [67] Gorsevski P V. An Evolutionary Approach for Spatial Prediction of Landslide Susceptibility Using LiDAR and Symbolic Classification with Genetic Programming [J]. *Natural Hazards*, 2021, 108(2): 2283-2307.
- [68] Gorsevski P V, Panter K. Landslide Detection and Susceptibility Mapping Using LiDAR and an Artificial Neural Network Approach: A Case Study in the Cuyahoga Valley National Park, Ohio [J]. *Landslides*, 2016, 13(3): 467-484.
- [69] Abdulwahid W M, Pradhan B. Landslide Vulnerability and Risk Assessment for Multi-hazard Scenarios Using Airborne Laser Scanning Data (LiDAR) [J]. *Landslides*, 2017, 14(3): 1057-1076.
- [70] Stoll J, Moritz D. Unmanned Aircraft Systems for Rapid Near Surface Geophysical Measurements [C]//The 75th EAGE Conference and Exhibition Workshops, London, England, 2013.
- [71] Supper R, Baroň I, Ottowitz D, et al. Airborne Geophysical Mapping as an Innovative Methodology for Landslide Investigation: Evaluation of Results from the Gschliefgraben Landslide, Austria [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, 13(12): 3313-3328.
- [72] Zhu Mingming, Lei Tao, Xia Juanjuan, et al. Research Progress of Unmanned Aerial Vehicle in Wounded Search and Rescue [J]. *International Journal of Biomedical Engineering*, 2020, 43(5): 387-393. (朱明明, 雷涛, 夏娟娟, 等. 无人机在伤员搜救中的应用及研究进展[J]. 国际生物医学工程杂志, 2020, 43(5): 387-393.)
- [73] Peng Bo, Zhang Dexuan. Study on Detecting Concentrated Leakage in Earth-Rock Dam by Infrared Imaging Technique [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(11): 93-98. (彭波, 张得煊. 利用红外热像技术探测土石坝集中渗漏的研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(11): 93-98.)
- [74] Frodella W, Gigli G, Morelli S, et al. Landslide Mapping and Characterization Through Infrared Thermography (IRT): Suggestions for a Methodological Approach from Some Case Studies [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 1281.
- [75] Xu Qiang, Lu Huiyan, Li Weile, et al. Types of Po-

- tential Landslide and Corresponding Identification Technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(3):377-387. (许强, 陆会燕, 李为乐, 等. 滑坡隐患类型与对应识别方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(3):377-387)
- [76] Booth A M, McCarley J C, Nelson J. Multi-year, Three-Dimensional Landslide Surface Deformation from Repeat LiDAR and Response to Precipitation: Mill Gulch Earthflow, California [J]. *Landslides*, 2020, 17(6): 1283-1296.
- [77] Fey C, Rutzinger M, Wichmann V, et al. Deriving 3D Displacement Vectors from Multi-temporal Airborne Laser Scanning Data for Landslide Activity Analyses[J]. *GIScience and Remote Sensing*, 2015, 52(4): 437-461.
- [78] Dewitte O, Jasselette J C, Cornet Y, et al. Tracking Landslide Displacements by Multi-temporal DTMS: A Combined Aerial Stereophotogrammetric and LiDAR Approach in Western Belgium[J]. *Engineering Geology*, 2008, 99(1/2): 11-22.
- [79] Lato M J, Anderson S, Porter M J. Reducing Landslide Risk Using Airborne LiDAR Scanning Data [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(9): 1-8.
- [80] Ekaso D, Nex F, Kerle N. Accuracy Assessment of Real-Time Kinematics (RTK) Measurements on Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for Direct Georeferencing [J]. *Geo-Spatial Information Science*, 2020, 23(2): 165-181.
- [81] Zhang Zuxun, Guo Dahai, Ke Tao, et al. The Use of Aerial Photogrammetry in the Fast Response for China Earthquake Rescue [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(6): 852-857. (张祖勋, 郭大海, 柯涛, 等. 抗震救灾中航空摄影测量的应急响应[J]. 遥感学报, 2008, 12(6): 852-857.)
- [82] Zhao W H, Wang R, Liu X W, et al. Field Survey of a Catastrophic HighSpeed Long-Runout Landslide in Jichang Town, Shuicheng County, Guizhou, China, on July 23, 2019 [J]. *Landslides*, 2020, 17(6): 1415-1427.
- [83] Xu Qiang, Zheng Guang, Li Weile, et al. Study on Successive Landslide Damming Events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6):1534-1551. (许强, 郑光, 李为乐, 等. 2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6):1534-1551.)
- [84] Travelletti J, Delacourt C, Allemand P, et al. Correlation of Multi-temporal Ground-Based Optical Images for Landslide Monitoring: Application, Potential and Limitations[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 70: 39-55.
- [85] Pellicani R, Argentiero I, Manzari P, et al. UAV and Airborne LiDAR Data for Interpreting Kinematic Evolution of Landslide Movements: The Case Study of the Montescaglioso Landslide (Southern Italy)[J]. *Geosciences*, 2019, 9(6): 248.
- [86] Gong Jianya. Chances and Challenges for Development of Surveying and Remote Sensing in the Age of Artificial Intelligence [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1788-1796. (龚健雅. 人工智能时代测绘遥感技术的发展机遇与挑战[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 1788-1796.)
- [87] Ji S P, Yu D W, Shen C Y, et al. Landslide Detection from an Open Satellite Imagery and Digital Elevation Model Dataset Using Attention Boosted Convolutional Neural Networks [J]. *Landslides*, 2020, 17(6): 1337-1352.
- [88] Ju Yuanzhen, Xu Qiang, Jin Shichao, et al. Automatic Object Detection of Loess Landslide Based on Deep Learning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11):1747-1755. (巨袁臻, 许强, 金时超, 等. 使用深度学习方法实现黄土滑坡自动识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11):1747-1755.)
- [89] Zhang Yongjun, Zhang Zuxun, Gong Jianya. Generalized Photogrammetry of Spaceborne, Airborne and Terrestrial Multi-source Remote Sensing Datasets [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(1): 1-11. (张永军, 张祖勋, 龚健雅. 天空地多源遥感数据的广义摄影测量学[J]. 测绘学报, 2021, 50(1): 1-11.)