



地质灾害遥感综合监测现状与展望

邵 芸^{1,2}, 张 茗¹, 谢 酬^{1,3}

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101; 2. 中科卫星应用德清研究院, 北京 100085;

3. 中国科学院大学, 北京 100101

摘 要: 中国是世界上地质灾害最频繁、受灾最严重的国家之一。因此, 利用更先进、更经济有效的手段对地质灾害进行监测和防治, 成为我国的当务之急。通过总结目前中国以及世界上关于微波遥感、光学遥感和 LiDAR 等多源遥感数据在地质灾害领域的应用现状, 包括地震、滑坡、地面沉降、地面塌陷、火山活动、冻土变化、冰川活动、土壤侵蚀、海岸侵蚀等地质灾害, 对遥感在地质灾害方面的应用提出新的建议。

关键词: 地质灾害; 遥感; InSAR; PolSAR; 航空摄影测量; LiDAR; 光学遥感; 多源遥感数据

PRESENT SITUATION AND PROSPECT OF COMPREHENSIVE MONITORING IN GEOLOGICAL HAZARD BY REMOTE SENSING

SHAO Yun^{1,2}, ZHANG Ming¹, XIE Chou^{1,3}

1. Aerospace Information Research Institute, CAS, Beijing 100101, China; 2. Deqing Academy of Satellite Applications, Beijing 100085, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: As one of the countries with the most frequent and serious geological disasters in the world, it is urgent for China to monitor and prevent geohazards via more advanced, more economical and effective means. The paper summarizes the application status of multi-source remote sensing data such as microwave remote sensing, optical remote sensing and LiDAR in the field of geohazard at home and abroad, including earthquake, landslide, ground subsidence, land collapse, volcanic activity, frozen earth change, glacial activity, soil erosion and coastal erosion, and puts forward some related suggestions as well.

Key words: geological hazard; remote sensing; InSAR; PolSAR; aerial photogrammetry; LiDAR; optical remote sensing; multi-source remote sensing data

0 引言

中国是世界上地质灾害最频繁、受灾最严重的国家之一, 具有分布广、突发性强、损失严重等特点^[1]。由于山区较多, 地形复杂, 地质灾害隐患点分布广

泛^[2]。受强烈地震和极端气象事件频发影响, 近年我国地质灾害处于多发态势。据自然资源部的调查数据显示, 截至 2020 年底, 我国已经发现的地质灾害隐患有 33 万余处, 但仍有大量地质灾害隐患未被发现, 仍

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-05-10. 编辑: 周丽.

基金项目: 国家重点研发计划项目“天空地协同遥感监测精准应急服务体系构建与示范”(编号 2016YFB0502500).

作者简介: 邵芸 (1961—), 女, 博士, 研究员, 从事微波遥感理论与应用研究工作, 通信地址 北京市朝阳区大屯路甲 20 号北 B-318, E-mail//shaoyun@radi.ac.cn

需开展大量的调查工作。

根据行业标准 T/CAGHP 001—2018 地质灾害分类分级标准(现行),地质灾害包括自然因素或者人为活动引发的危害人民生命、财产和地质环境安全的滑坡、崩塌、泥石流、地裂缝、地面沉降、地面塌陷等与地质作用有关的灾害^[3]。据自然资源部地质灾害灾情通报显示,2020年至2022年3月,全国共发生地质灾害12 816起,从灾情类型看,滑坡7 187起,崩塌3 672起,泥石流1 274起,地面塌陷500起,地裂缝164起,地面沉降19起。从灾情等级看,2021年至2022年3月,特大型地质灾害36起,大型地质灾害28起,中型地质灾害329起,小型地质灾害4 583起,共造成232人死亡(失踪),65人受伤,直接经济损失82.6亿元。2020年至2022年3月,全国共成功预报地质灾害1 444起,涉及可能伤亡人员43 890人,避免直接经济损失24.5亿元。

由上可见,地质灾害已经对我国人民的生命财产安全造成了极大的威胁。因此,利用更先进、更经济有效的手段对地质灾害进行监测和防治,成为我国的当务之急。而遥感技术则为这一问题提供了有效的解决方法。

遥感是应用探测仪器,不与探测目标相接触,通过探测物体与特定谱段电磁波的相互作用(辐射、反射、散射、极化等)特性,从远处把目标的电磁波特性记录下来,通过分析,揭示出物体的特征性质及其变化的综合性探测技术^[4]。它是在航空摄影的基础上发展起来的,1972年美国搭载多光谱扫描仪(MSS)的陆地卫星(Landsat)发射成功,标志着遥感作为一门新型技术学科的确立。遥感技术发展至今,从观测方式上可以分为3类:1)微波遥感技术,包括InSAR、极化SAR等;2)光学遥感技术,包括卫星平台和航空平台上的可见光、热红外、高光谱遥感技术;3)机载LiDAR遥感技术。

遥感具有宏观性、综合性、多尺度、多层次的特点,能够对地质灾害进行大范围、长时间、高时效性、立体地监测。相对于传统的地质灾害观测手段,它具有以下优点。1)遥感数据覆盖范围大。遥感卫星轨道高度通常在150 km以上,能够观测到的面积非常广,即使是高度较低的航空摄影,高度也能够达到20~30 km。对于地势险峻,人力所不能及的地区,遥感监测也能获取到当地的数据。2)遥感数据观测时间长、完整性高。遥

感卫星往往能够获取过去几十年间的数据,方便对地质灾害进行时序监测。此外,中国南方山区常年处于阴雨环境下,地质灾害频发,受天气影响,经常无法获得完整的数据,而遥感的微波波段能够穿透云雾、小雨,做到全天时、全天候对地监测,极大地保证了数据的完整性。3)遥感数据时效性高。遥感数据具有获取速度快、获取成本低的特点。传统的地质灾害监测方法费时费力,常常耗费数十倍于遥感的成本,还难以获取实时的数据。4)遥感监测中的微波可以穿透植被及干燥地物等,排除地面覆盖物的干扰,对于探测地面沉降、地面塌陷等地质灾害十分重要。5)遥感数据信息量大。遥感数据能够囊括从紫外线到微波甚至超长波等诸多波段,对于运用不同波段信息识别不同的地质灾害、监测地面变化具有十分重要的意义^[4-6]。

本文在前人研究的基础上系统总结监测地质灾害的不同遥感手段,并结合应用实例展示这些遥感手段的应用现状,分别论述其不同地质灾害应用领域的优势与不足,最后指出遥感在地质灾害领域目前存在的问题,并对未来地质灾害遥感的发展方向提出展望。

1 微波遥感在地质灾害方面的应用

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种主动式微波遥感,其显著特点是主动发射电磁波,具有不依赖太阳光照及气候条件的全天时、全天候对地观测能力,并对云雾、小雨、植被及干燥地物有一定的穿透性,可以用来记录地物的散射强度信息及相位信息。前者反映了地表属性(含水量、粗糙度、地物类型等),后者则蕴含了传感器与目标物之间的距离信息^[7-9]。相对于光学遥感而言,它能够穿透云雾的特性使其不受天气和时间的影响,可在阴雨天气和夜间持续地监测,这对于监测具有突发性的地质灾害具有十分重要的意义^[7-9]。

1.1 InSAR 技术

合成孔径雷达干涉测量技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)集合成孔径雷达技术与干涉测量技术于一体,而合成孔径雷达差分干涉测量(Differential InSAR, D-InSAR)则是将由雷达对同一区域两次或多次获取的复影像数据提取出的电磁波信号的相位信息,通过相位差计算,从蕴含了大量信息的一幅或者多幅干涉条纹图中提取地面地形和目标的

微小形变信息^[7-9]。因为 D-InSAR 对垂直方向的形变比较敏感,它能够反演地表三维空间位置及其微小变化^[10-11],精度能达到厘米级别^[12]。因此该遥感技术在地质灾害领域的大范围地表形变监测方面应用非常广泛^[13],涉及到地震、滑坡、地面沉降^[14]、地面塌陷、火山活动等方面的应用。

(1)地震方面。1989年, Gabriel 等首次利用 Seasat 卫星数据进行了差分干涉测量实验,测量了美国加利福尼亚州东南部 Imperial 河谷灌溉区的地表形变,证实了 InSAR 在监测地表形变方面的能力^[13]。1993年, Massonnet 等利用 ERS-1 SAR 数据对 1992 年 Landers 地区的地震进行了研究,并将测量结果与其他的测量数据进行了对比,结果相当的吻合,并将其研究成果发表在 *Nature* 杂志上,引起了国际地震界的广泛关注,属首次应用 InSAR 技术监测到地表同震形变^[15]。2006年, Dixon 等采用 SAR 数据监测到了新奥尔良地区的地面沉降并制成了城市地表沉降图^[16]。2009年,单新建等利用 JAXA 的 ALOS PALSAR 数据(L波段)获取汶川 M_s 8.0 级地震的同震形变场,监测到整个四川盆地发生了不同程度的地表形变^[17]。2010年,邵芸等使用 ALOS PALSAR 数据获取了玉树 M_w 6.9 级地震的同震形变场,监测到地震变形沿玉树-甘孜断裂带扩展,其测量的结果与中国地震局地面调查的结果一致,对于评价玉树地震的破坏程度,研究地震形变和地震孕育特征具有重要意义^[18]。2010年, Calais 等结合 GPS 与 InSAR 技术对海地太子港(Port-au-Prince)地区发生的 M_w 7.0 级地震进行了研究,监测到地面兼有垂直和水平方向的运动,引起了地面的压缩^[19]。2013年, Marshall 等利用 InSAR 技术对加利福尼亚南部的断层滑动速率和震间形变模式进行了研究,并且使用 GPS 数据验证了其精度^[20]。2014年,刘云华等利用 RadarSat-2 数据,获取了芦山地震同震的部分形变场并反演了震源参数,为进一步的研究提供了参考^[21]。2016年, Elliott 等总结了过去 20 年里 InSAR 技术建立地震模型的能力,其厘米级别的精度为认识大陆变形的机制提供了极大的帮助,而其极高的时效性能够在地震预警方面(如检测到震前地面形变)做出贡献^[22]。2017年,邵芸等利用 Sentinel-1 数据获取了九寨沟 M_w 7.0 地震的同震形变场,反演了其同震滑动分布^[8]。2017年,蔡杰华等利用 D-InSAR 技术和时间序列 InSAR 技术对九寨

沟地区震后的滑坡隐患进行了早期识别与探测^[23]。

(2)滑坡方面。2004年, Hilley 等使用 ERS-1 和 ERS-2 数据对旧金山湾区东部 Berkeley 地区在 1992—2001 年发生的缓慢运动的滑坡进行了研究,结合当地的降雨数据,得到滑坡滑动的季节性加速与降雨量密切相关的结论,并将成果发表在 *Science* 上,证明了 InSAR 技术在滑坡领域的应用潜力^[24]。2012年,廖明生等利用高分辨率 SAR 影像幅度和差分干涉相位信息,成功地检测到三峡库区滑坡发生所处的时间段、地点以及形变,验证了运用 InSAR 技术进行滑坡检测的有效性^[25]。2016—2020年,邵芸等持续开展了多云多雨喀斯特地貌区的高危滑坡隐患 InSAR 排查研究^[7-9]。2017年,李梦华等以 Sentinel-1A/1B 为数据源,运用时序 InSAR 方法,对四川茂县岷江河谷区段的滑坡隐患进行了识别,找到了 20 多处隐患^[26]。2018年,刘斌等使用 IBIS-L 地基 InSAR 系统开展了奉节大树场镇灾后滑坡、神农架林区人工不稳定斜坡和备战铁矿露天采矿边坡的监测,其精度达到亚毫米级,扩展了 InSAR 在滑坡领域的调查与监测手段,为星载和地基 InSAR 技术在地表形变监测方面的综合应用奠定了技术基础^[27]。2019年,许强等提出通过 InSAR 和地面观测手段,在掌握滑坡崩塌的变形规律和阶段以及时间-空间变形特征的基础上,建立分级综合预警体系^[28]。2019年,李振洪等总结了卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用,提出目前雷达遥感面临 4 个挑战,分别是干涉去相干、大气干扰、斜视成像几何畸变和地形效应,并就现状提出了展望与对策^[29]。2021年,王哲等结合 ALOS/PALSAR-2 的升轨和降轨影像,对西藏发生了易贡滑坡的扎木弄沟地表的形变进行了监测,探测到研究区域整体处于稳定状态,但有 6 个形变体,证实了在地形陡峭的区域,结合 SAR 的升降轨影像可以大大减少 InSAR 监测滑坡时产生的盲区,提高滑坡识别的成功率^[30]。由于滑坡多发生在植被茂密的山区,地形复杂,山体陡峭,时间去相干、空间去相干和大气影响制约了 D-InSAR 技术在滑坡形变监测中的广泛应用。为了消除 D-InSAR 的局限,进一步发展了多时相 InSAR(MT-InSAR)技术。目前, MT-InSAR 已广泛应用于地表形变监测、滑坡区域地图的绘制、滑坡建模、滑坡的危害与风险评估等方面^[7]。

(3)地面沉降方面。1997年, Massonnet 等采用

ERS-1 数据对南加州 East Mesa 的地热发电站周围的地面状况进行了监测,并与当地的测量数据对比,证明了 InSAR 数据用于监测地面沉降的潜力^[31]. 1999 年, Amelung 等采用美国内华达州拉斯维加斯在 1992 年 4 月至 1997 年 12 月期间的 ERS 图像测量当地的沉降情况,并与当地测量的水准数据相比较,显示在过去十年中,由于地下水开采的减少,导致地下水位上升,使沉降率有所下降;该研究还使用 InSAR 数据监测了季节性的沉降和上升模式,得到了关于含水层系统的弹性和非弹性特性及其空间变异性的信息,证明了 InSAR 数据用于监测地面沉降及其季节性升降的能力^[32]. 2001 年, Hoffmann 等利用 InSAR 数据对拉斯维加斯峡谷的季节性沉降及其恢复进行了监测,证实当地的地下水人工补给政策确实抬升了地下水的水位和地面的高度^[33]. 2005 年,吴立新等利用 ERS-1 和 ERS-2 数据对唐山市及开滦矿区的地面沉降进行了研究,证明可以利用多时相 D-InSAR 技术结合角反射器(或平面反射器)方法进行工矿区地表沉陷监测^[34]. 2007 年,王艳等采用上海市主城区约 100 km² 区域在 1992—2000 年间的 25 景 ERS-1/2 的单视复影像,利用长时间序列的相干目标分析方法研究地面沉降的形变规律,其研究表明 InSAR 可以很好地应用于地面沉降观测,并成为地表缓慢形变观测应用领域提高时间、空间尺度信息量的一项非常有前景的技术^[35]. 2014 年, Chaussard 等使用 2007—2011 年墨西哥中部地区的 ALOS 数据进行 InSAR 时间序列分析,确定了包括 17 个城市在内共 21 个地区有地面沉降,比以前有记录的数量要多得多,并确定发生地面沉降的原因是地下水的过度开采和地下水水质的下降,证明了 InSAR 技术能够在城市规划方面提供有力的支撑^[36]. 2014 年, Tomas 等利用 D-InSAR 识别出西班牙 19 个沉降区(包括矿区、地下水开采地区、火山地区等),证明了 D-InSAR 对于识别和监测未知沉降区有着巨大的作用^[37]. 2016 年,孙晓鹏等采用 SBAS-InSAR 技术对成都平原的地面沉降状况进行了监测,该技术能够较好地克服时空失相干限制,获得大范围毫米级精度的地表形变信息^[38]. 2021 年,李金超基于 D-InSAR,使用 Sentinel-1A 的图像,采用时序 InSAR 中的 SBAS-InSAR 技术对淮南矿区的形变进行了识别,再一次证明了 SBAS-InSAR 对于减小误差和削弱失相干影响的能力^[39].

(4) 地面塌陷方面. 2009 年, Castaneda 等利用 SBAS-InSAR 技术对西班牙 Ebro 河流地区的地面塌陷进行了研究,证明了 InSAR 技术在寻找陷坑方面的应用能力^[40]. 2018 年, Theron 等总结了地面塌陷的机制,并阐述了 InSAR 技术用于测定地面塌陷的原理和方法,阐明了 InSAR 技术可以定量、定点监测地面塌陷,并且可以通过发现地面的前兆变形对地面塌陷进行预警,降低基础设施的损害,保护人类生命财产安全,并且还可以通过开展地面主动补救工作来降低地面维护成本^[41].

(5) 火山活动方面. 1995 年, Massonnet 首次使用 ERS-1 卫星从上升和下降轨道获取的两组合孔径雷达图像数据对 Mount Etna 1992 年 5 月 17 日至 1993 年 10 月 24 日的图像进行了监测,成功监测到了火山喷发前地表的收缩形变^[15]. 2000 年, Amelung 等采用 InSAR 技术对 Isabela 和 Fernandina 岛的火山在 1992—1999 年间的形变进行了监测,发现有些火山周围的断层形成了类似“活动门板”的构造,降低了岩浆室上方的应力,从而解释了为何有些火山周围地面监测到有大规模隆起却没有喷发的原因,并将成果发表在 *Nature* 上,给人们火山爆发进行有效预警提供了支持^[42]. 2004 年, Pritchard 等采用 ERS-1/2 卫星数据监测了 1992—2002 年安第斯山脉中部约 900 座偏远火山的活动状况并作出了分析^[43]. 2007 年, Amelung 等使用 Radarsat-1 数据,找到了 Mauna Loa 火山 2002—2005 年西南裂谷带中深度岩脉状岩浆体长期膨胀的证据,得到了 Mauna Loa 火山岩浆的新模型,表明应力转移在控制地下岩浆堆积中起着重要作用,并将结果发表在 *Science* 上^[44]. 2010 年, Fournier 等采用 ALOS PALSAR 数据对 2002—2008 年拉丁美洲地区的火山进行了监测,并且与之前世界上其他地区的 100 多个火山的变形研究相结合,计算该地区火山地表变形的频率、量级和持续时间^[45]. 2016 年, Ruch 等采用 COSMO-SkyMed 卫星的数据对位于冰岛的 Ba' rjarbunga 火山口的岩脉入侵进行了监测,增进了对于火山地区裂谷机制和演化的理解^[46]. 2021 年, Varugu 等采用 InSAR 技术 COSMO-SkyMed 的数据对 Mauna Loa 火山 2014—2020 年之间其内部岩浆的活动状况进行了监测,结果表明该火山的岩浆体拓宽了约 4.5 m,并对之后这座活火山的活动情况做出了预

测^[47].

(6)冻土变化方面. 2008年,谢酬等选用4景覆盖青藏高原东北部的北麓河区域的ALOS PALSAR数据,对研究区域进行冻土形变检测,并与覆盖北麓河研究区3景ASAR数据进行了对比分析,证明PALSAR数据更适用于植被覆盖区域的分析,同时还证明了PALSAR数据能够有效进行多年冻土区的形变分析^[48]. 2013年,李珊珊等提出将SBAS-InSAR应用于监测冻土,并利用周期形变模型来代替传统的SBAS方法中的线性形变模型以解决冻土形变呈现明显的季节性特征的问题,利用2007—2010年的21景ASAR影像图作为实验数据,成功获取了青藏高原从羊八井站—当雄站铁路段冻土区的地表形变时间序列图,与当地的温度数据联合分析,发现其变化状况与冻土的物理变化规律非常一致,证明了SBAS-InSAR技术在冻土形变监测中具有良好的发展应用前景^[49]. 2017年, Daout等采用InSAR数据对西藏西北部多年冻土活动层的空间变化及其时间演变进行了研究,检测到了西藏西北部地区地表季节性沉降现象并定量进行了分析^[50]. 2021年,王京利用Sentinel-1A数据、TerraSAR-X数据、ALOS-2 PALSAR-2数据对青藏高原的冻土冻融的过程进行了监测并制图,为青藏高原地区冻土相关灾害的防治和环境保护提供了有利的科学依据^[51].

1.2 极化 SAR

极化作为电磁波的本质属性,是幅度、频率、相位以外的重要基本参量,描述了电磁波的矢量特征,即电场矢端在传播截面上随时间变化的轨迹特性. 目标变极化效应所蕴含的目标丰富物理属性信息对提升雷达的目标检测、抗干扰、分类和识别等能力具有极大潜力. 极化SAR具备全极化测量能力,能够获取目标的全极化信息,使得对目标极化散射机理进行完整刻画成为可能. 极化信息的提取已经成为近几年SAR遥感发展的新方向. 相对于单极化数据而言,全极化SAR图像可以更好地阐释散射机制的变化,并且蕴含着丰富的极化信息,因此如何合理利用极化特征来提取灾后建筑物的损毁信息成为了研究重点^[7-9]. 它在监测地震与滑坡方面应用广泛.

2016年,翟玮等利用“4.14”玉树地震震后机载PolSAR影像提取了当地的倒塌建筑物,及时获取了当

地建筑物震害信息^[52]. 2019年,李强等利用分辨率为1 m的C频段多极化高分三号卫星数据,对九寨沟进行了地震滑坡自动快速识别,为九寨沟地震景区的震后重建提供了依据^[53].

1.3 多源 SAR

近年来,随着雷达卫星遥感技术的不断发展,集宽幅SAR、InSAR和极化SAR为一体的雷达系统,即多源SAR手段融合了多种SAR的优点,相互弥补,为监测地震等地质灾害提供了更为有效和精确的手段.

2010年,郭华东等结合宽幅SAR、InSAR和极化SAR对玉树地震进行监测. 首先利用RadarSat-2的宽幅SAR数据对玉树地震的区域地质构造和岩性分布特征进行解译,找到4处主要断裂. 之后利用ALOS/PALSAR升轨重轨干涉测量数据,获取了同震形变场,得到同震形变场是以北西向发震断层甘孜—玉树断裂带为中轴分布的,基本与该断层成平行分布. 再利用2010年4月21日升轨的RadarSat-2精细模式极化数据对当地的倒塌建筑物进行解译分析,同时与4月15日获得的机载高分辨率光学影像解译出的结果进行对比,得到倒塌建筑的识别率为88%,未倒塌建筑的识别率为80%^[54].

2 光学遥感在地质灾害方面的应用

2.1 光学卫星遥感

光学遥感通常是指对目标在可见光、近红外和短波红外电磁谱段进行成像观测,记录的是地表对太阳辐射的反射和自身发射的能量,进而获取和分析被观测对象的光学特征信息. 光学遥感技术经过长时间的发展,已经能够获得高空间、高光谱和高时间分辨率的遥感数据^[4]. 相对于微波遥感,它不需要满足雷达影像的高相干性条件,在地表变化状况较为剧烈的地区,也能得到理想的数据. 此外,光学卫星遥感影像还能监测到研究区域植被的变化状况,为地质灾害监测进行辅助. 其在监测滑坡、地面塌陷、火山活动、冰川活动、土壤侵蚀方面应用广泛.

(1)滑坡方面. 2006年,王治华采用天台乡滑坡区域的TM、IKONOS和QuikeBird在滑坡前、后两个时相的数据,结合当地的DEM数据、地形图和现场实测GPS控制点,对滑坡进行解译,得到了滑坡的边界及地表特征、运动特征和规模^[55]. 2007年,邓辉利用

QuickBird-2 的 2004 年的影像,将 1、2、3 波段进行真彩色合成用于主要分析,再辅以 4、3、2 波段的合成图像,对长江三峡地区的白衣庵滑坡和巫山县城下游等地的崩塌堆积体进行了解译^[56]. 2008 年黄润秋等利用汶川地震后的日本 ALOS 卫星影像数据和中国国土资源航空物探遥感中心的航空遥感数据,并结合国土资源部门的地质灾害隐患点的应急排查资料,迅速完成了汶川地区 16 个重灾县 11 308 处地震滑坡编目图^[57]. 2017 年,彭令等以“5.12”大地震受灾严重的汶川县为研究区域,采用资源三号和高分一号的高分辨率光学卫星影像数据,利用多尺度最优分割方法进行多层次滑坡对象构建,同时结合地震滑坡的发育特征建立了滑坡识别的特征规则集合,采用分层识别模型,实现滑坡区域的提取与滑坡要素的精确识别,最后通过与目视解译及野外调查验证结果进行对比分析,验证了结果的整体精度^[58]. 2019 年,唐尧等采用国产高分二号与北京二号等国产遥感卫星影像并结合部分灾区现场照片资料,对“10.11”金沙江高位滑坡开展灾情应急监测,识别了该滑坡的各项特征并对周边的灾害隐患地区进行了识别,证明了国产遥感卫星在国家重特大地质灾害应急监测方面发挥了重大作用^[59]. 2020 年,郭忻怡等利用高分辨率光学遥感技术建立了遥感影像上植被异常与滑坡蠕变的关系,弥补了 InSAR 等技术在植被茂密、地形陡峭等条件下监测能力的不足^[60]. 2020 年,龙玉洁等利用 Landsat 7、SPOT-5、RapidEye、Planet 影像,采用最大似然法和 RF 算法对 2008 年汶川地震后 10 a 内绵远河流域滑坡进行了识别与自动提取,证明了 RF 算法的识别精度更高^[61].

(2)地面塌陷方面. 2013 年,周学珍等利用具有 1 m 空间分辨率的 IKONOS 数据,通过识别地裂缝,确定了陕西神府煤矿区地面塌陷的范围^[62].

(3)火山活动方面. 2020 年,Michael 等对 ASTER 数据库在全球各地过去 20 a 内拍摄的 32 万个与火山相关的红外影像进行挖掘,从中找出了 2 000 多幅影像,对全球的火山分别进行了以 1 a、5 a 和 20 a 为尺度的观测,研究它们的变化^[63].

(4)冰川活动方面. 相较于光学遥感影像,InSAR 的影像需要很强的相干性,只有时间间隔很短的影像才能满足要求,这不利于进行长时期冰川的活动监测. 而光学影像则没有这个限制,可以进行年际影像的对

比. 2009 年,黄磊等利用 Landsat 5 和 Landsat 7 的近红外波段,对天山冰川区 1991—2000 年的冰川平均运动速度进行了计算^[64]. 2011 年,许君利等利用 2001—2009 年的 3 组(6 期)ASTER 遥感影像反演了天山托木尔峰科其喀尔巴西冰川表面的运动速度,并与花杆测量数据进行对比,平均绝对误差为 3.1 m/a,相对误差为 11.9%,反演精度符合要求^[65]. 利用光学遥感影像对冰川运动速度进行研究,为我们在全球变暖的大背景下对冰川活动进行监测起到了重要的作用.

(5)土壤侵蚀方面. 2021 年, Zhu 等利用 Landsat TM 在 2000、2005、2010 和 2020 年的影像监测了甘肃省天水市麦积区的土壤侵蚀状况,并对不同区域的侵蚀程度进行了分级^[66].

2.2 航空摄影测量

航空摄影测量指的是在飞机上用航摄仪器对地面连续摄取像片,结合地面控制点测量、调绘和立体测绘等步骤,绘制出地形图的作业. 它可以将地形测量的大部分外业工作转移到室内进行,克服了不易到达地区野外测量的困难,并能真实、详细地反映地物、地貌. 现在普遍偏向使用无人机作为遥感平台对研究区域进行探测,涉及地震、滑坡、地面沉降等方面.

(1)地震方面. 2003 年,王晓青等人采用机载光学遥感对巴楚-伽师地震地区进行了数据采集,对研究区域的震害进行了评估,识别了倒塌建筑物和地震次生灾害^[67]. 2013 年,在郭华东的组织下,王福涛等利用四川芦山地震后航空遥感飞机 B-4101 携带的光学传感器拍摄的多光谱航空遥感数据,结合震前的 SPOT5 和资源 3 号全色和多光谱遥感影像,首先结合次生地质灾害在高分辨率多光谱影像上的形态、结构和纹理特征,对地震重灾区次生地质灾害的数量和空间分布进行了有效监测^[68]. 2015 年,王晓青等采用四川芦山震后快速获取的高分航空遥感影像,进行了灾区建筑物震害应急提取和震害指数计算,并将遥感评估结果与现场实际调查结果进行比较分析,验证了使用遥感数据得到的结果的准确性,证明了震后的高分航空遥感影像可以在地震应急阶段快速对地震进行评定,时效性高,之后再结合地震现场实地调查资料能够进一步提高结果的准确性和精度^[69]. 2021 年,范熙伟等利用无人机获取热红外遥感数据,提取了北川地震遗址的地震倒塌房屋数据,将震后房屋倒塌类型分为

未倒塌、部分倒塌和倒塌共3个破坏等级,为震后重建和救援提供了依据^[70]。

(2)滑坡方面. 2014年, Lucieer等利用小型无人机拍摄了 Tasmania 东南部 2011年7月19日和11月10日的影像,从图像中提取出了滑坡并建立了滑坡的三维模型,通过与地面控制点进行比较测试,其水平精度为7 cm,垂直精度为6 cm,建立了一个高精度的滑坡模型^[71]。2019年,李维炼等使用无人机采集了金沙江特大滑坡灾害的遥感数据,并依此构建了滑坡灾害的VR场景,支持用户沉浸式交互与滑坡灾情信息分析,大大提高了滑坡灾害监测的可视性^[72]。

(3)地面沉降方面. 2018年,高冠杰等使用四旋翼无人机对宁夏羊场湾煤矿拍摄了2016—2017年间的3期光学影像,空间分辨率在2 cm以内,对其采煤沉降量进行了监测^[73]。

3 激光雷达在地质灾害方面的应用

激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)是激光技术与传统雷达相结合的产物,以激光束作为信息载体,可以用相位、频率、偏振和振幅来搭载信息的主动式雷达^[74]。激光雷达是对地表三维坐标的直接测量,而传统的摄影测量或者雷达干涉测量(InSAR)都是通过间接的方法获得地表三维数据^[74]。由于激光雷达发射激光束频率较传统雷达高几个数量级,加上激光具有高亮度性、高方向性、高单色性和高相干性特点,所以激光雷达能够精确测距、测速和跟踪,还具有很高角分辨率、速度分辨率和距离分辨率,对更小尺度的目标物也能产生回波信号,在探测细小颗粒方面有着特有优势^[74]。因此在小范围的地质灾害监测方面,它能够提供最精度的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM),监测到的地表形变也更为精确。其在监测地震、地面沉降、土壤侵蚀、海岸侵蚀等方面有着广泛的应用。

(1)地震方面. 2018年,余金星等采用机载LiDAR测量技术,快速获取了九寨沟地震核心景区的激光点云数据,并用这些数据构建了高精度DEM模型和数字正射影像图(Digital Orthophoto Map, DOM),利用专家经验和计算机自动识别技术,对九寨沟的地质灾害隐患进行了早期的识别与分析,为震后危险区域的实时监测提供了重要的手段^[75]。

(2)地面沉降方面. 2015年,陈梦雪等利用机载LiDAR获取了钱塘江北岸海塘的数据,再利用车载LiDAR获取了钱塘江南岸海塘的数据,利用这些数据生成了海塘的DEM数据并进行了剖面分析,对比同一地区两期DEM的不同,监测钱塘江海塘的沉降情况,发现海塘工程沉降情况并不明显,尚且安全^[76]。2018年,张永庭等利用两期无人机机载LiDAR三维点云数据,对宁东煤矿基地马连台煤矿的矿区沉降状况进行了监测,得到了研究区域的三维立体图,共监测出了3处地面沉降区;之后将结果与GPS自动监测数据进行对比分析,最大误差值0.0532 m,平均误差为0.0434 m,小于0.40 m,完全满足了精度要求^[77]。

(3)土壤侵蚀方面. 2007年,陈剑桥在金沙江溪落渡水电站水土保持监测项目(XLD/0340)中,利用LiDAR对杨家沟渣场进行了测量,并结合差分GPS数据,计算渣场的土石方量,从而达到监测杨家沟渣场水土流失状况的目的^[78]。

(4)海岸侵蚀方面. 2019年,Michel等利用无人机机载LiDAR对法国的鲁西荣平原的海岸线状况进行了监测,比起光学摄影测量,在有植被覆盖时LiDAR能够提供更加精确的DTM数据,其数据处理速度更高;通过与土地测量收集的点数据进行比较,平均误差为4.0 cm,Z的标准偏差为9.5 cm,在海滩沙地这种软质地面上得到了精度非常理想的数据^[79]。

4 多源遥感技术

不同来源的遥感数据在监测不同的地质灾害方面各有优势,但由于不同遥感技术获取数据和成像方法的不同,每种遥感技术也都有着难以弥补的缺陷。随着遥感技术的发展,从光学、热红外和微波等使用不同方法对地观测的卫星传感器越来越多,同一地区能够获取的遥感影像数据种类也随之变多。由于不同的遥感监测手段获取的信息量不同,优势也不同,可以做到相互弥补,因此从多源数据中能够提取比单源数据更丰富、更可靠、更有用的信息,可以提高影像的空间分辨率,提高数据分类的精度与可靠性,增强解译和动态监测能力,减少模糊度,有效提高遥感影像数据的利用率。多源遥感数据目前在地震、滑坡、地面沉降、火山活动、冰川活动等方面有广泛应用。

(1)地震方面. 利用多源遥感数据,可以同时地对地

震的震前、震后、震害的状况进行综合监测,弥补不同的遥感手段在监测方面的不足. 由于地震区域在震前会有显著的地表热异常,因此可以利用光学卫星热红外遥感为震前预警提供可行的手段^[80]. 震后则可以根据具体情况,利用 InSAR 或者是 LiDAR 对地表垂直形变进行监测,及时确定受灾区域状况,并且可以确定地震次生灾害隐患点,及时做出预警,其精度可以达到厘米级别. 对于地震损害评估,则可以利用 IKONOS、QuikeBird 等光学卫星确定地表建筑物损毁状况等,对震害进行评估. 2005 年,单新建等采用 ETM、SPOT、IKONOS、ERS-1/2、SAR 等多源卫星图像的解译和分析,获取了昆仑山口西 $M_w 8.1$ 级地震破裂带空间分布与形变特征^[81]. 2020 年,由于九寨沟地区植被茂密,InSAR 成像的相干性很差,董秀军等采用光学卫星影像和机载 LiDAR 点云数据生成的 DEM 对九寨沟地震的震后状况进行了监测. 首先利用上述数据对九寨沟地区的地质构造和岩体结构进行了解译,利用光学影像和 LiDAR 数据共解译研究区已存在的不良地质现象 83 处,其中古滑坡 7 处、崩塌堆积体 57 处、泥石流沟 19 处. 之后,采用岩体结构面组合分析及类比等方法,共解译出存在隐患的灾害点 26 处,其中崩塌危岩体 16 处、不稳定斜坡 8 处、泥石流沟 2 处^[82].

(2) 滑坡方面. 2009 年, Roering 等利用 D-InSAR、机载 LiDAR 和航空影像历史数据对北加利福尼亚州地区的滑坡进行了研究. 先利用 ALOS 数据确定了 5 个大型滑坡(>1 km)的位置,再利用机载 LiDAR 和航空影像历史数据监测地表树木位移的状况,结合 D-InSAR 图像,计算出滑坡的运动速率和地面泥土剥蚀速率^[83]. 2019 年,许强等提出通过构建天-空-地一体化的“三查”体系进行重大地质灾害隐患的早期识别.“三查”体系首先通过卫星光学遥感和 D-InSAR 技术实现区域扫面性地质灾害隐患的普查,随后利用 LiDAR 和无人机摄影测量实现高地质灾害风险区段和重大地质灾害隐患的详查,最后采用现场调查、地面与坡体内部探测等手段,实现重大地质灾害隐患的复核确认和排除,即核查^[28]. 2019 年,陆会燕等先使用光学卫星遥感影像确定了金沙江白格滑坡区域的 51 处滑坡隐患,再在此基础上采用 SBAS-InSAR 技术对具有堵江风险的重点区域的 ALOS PALSAR-1 和 Sentinel-1A 雷达卫星数据进行处理,共探测出 7 处滑

坡隐患具有较显著形变,其中 3 处堵江风险较大,为滑坡防治提供了数据支持^[84].

(3) 地面沉降方面,2017 年,何倩等结合 InSAR 和 LiDAR 数据对河北省邯郸市的矿区沉降情况进行了监测. 利用高精度的 LiDAR 数据绘制了矿区精度为 1 m 的 DEM 模型,解决了目前常用的 SRTM DEM 数据分辨率只有 30 m、精度过低、会造成沉降数据误差过大的问题;之后采用精度为 3 m 的 TerraSAR 数据与 SRTM 和 LiDAR 生成的 DEM 分别进行差分处理,与水准测量方法获取的地表沉降量做对比,发现 LiDAR 生成的 DEM 大大减小了下沉值的误差,提高了监测精度^[85]. 2022 年,Wang 等利用无人机航空摄影测量技术和 InSAR 数据,对中国西部地区的王家塔煤矿的地面沉降状况进行了分析. 从 2018 年 6 月至 2019 年 4 月共获取了 10 幅 ALOS 卫星的 SAR 图像,依此绘制了矿区的 DEM 图像,同时进行了 4 次无人机观测,获取了在这一年的煤矿开采期间工作面完整的变形场,证实了随着当地煤矿开采工作面的扩大、加深,当开采深度大于煤层埋深的 1.2~1.4 倍时,超过临界条件,引起了地面沉降,最大沉降量为 2.780 m,沉降率基本保持在 0.25 m/d;最后,通过全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)获得的数据对该方法的准确性进行了测定,证明通过融合多种遥感数据能给构建完整、精确、高时间精度的沉降盆地模型提供一种有效的新方法^[86].

(4) 火山活动方面. 2000 年, Francis 等提出结合光学卫星的热红外数据和雷达卫星的数据对火山活动进行研究,指出可以利用光学卫星遥感的热红外辐射数据监测火山的活动水平,这对于自动探测火山喷发和研究火山熔岩的分布非常有效;与此同时利用卫星雷达数据,这样就可以克服光学影像受大气、观测时间影响严重的缺点,不仅可以透过云层并且还可以在夜间观测火山的活动,同时提供高分辨率的地形数据^[87]. 2006 年, Pavez 等结合 InSAR、光学航空摄影测量与地面数据,对智利的 Lascar 火山 1993 至 2000 年的活动状况进行了监测,结合航空摄影测量数据和 GPS 地面测量数据得到的高精度、高分辨率的 DEM,提高了 Lascar 火山的 InSAR 图像成像精度,然后使用高精度的 InSAR 数据对与 Lascar 火山周期活动相关的地表变化进行厘米级别的监测,证实在 1993 年 4 月的喷发

之后,火山周围地表没有持续的大规模变形^[88]。

(5)冰川活动方面.2005年,Kaab等提出可以结合光学影像数据对冰川光谱分类的结果与从合成孔径雷达和LiDAR数据中建立的DTM模型,计算冰川的位移量,从而对冰川活动进行监测^[89]。2021年,吴立新等采用天地空协同监测的方式对波密县天摩沟地区的冰川活动进行了研究.由于该地区地形陡峭,积雪量大,云雾量大,冰川厚度大,因此单一的遥感手段无法实现精确且连续地监测,他们利用InSAR可以穿透云雾和光学卫星可以穿透冰层的优势定量估计冰川的潜在物源体积,再结合无人机热红外可以区分冰层和岩层的能力以及光学遥感时空分辨率高的特点,划定冰川分布的位置.最终根据不同遥感手段的特点制定了三类监测方案:A)精细获取单一冰川流域孕灾环境本底信息与灾变过程表观数据;B)获取和分析大范围内多个冰川流域、多个灾害要素的长期变化信息;C)在冰川流域灾害发生后及时为国家及地方政府的应急救援提供数据保障与信息支持^[90]。

5 结论与展望

伴随着遥感技术的不断创新升级,各种遥感技术的理论也逐渐成熟,迄今已经有多种遥感技术被用于监测各种地质灾害,人们对于监测地质灾害的精度和准确度也在不断地上升.但目前地质灾害遥感领域仍面临许多挑战,需要在以下几个方面进一步加深研究与讨论.

(1)地质灾害发生地区常具有地势复杂、植被茂密、云层密度大、地表覆盖物变化剧烈等多重问题,在监测时仅使用单一的遥感手段往往会有缺陷.比如使用微波遥感进行监测时,往往需要几幅图像之间具有很强的相干性,这在植被茂密或是地表覆盖物变化剧烈的情况下难以实现,极大程度上限制了微波遥感的发挥;光学遥感影像虽然没有这方面的限制,但是对于监测地面微小形变的能力不如微波遥感和LiDAR,对地表覆盖物的穿透性也不够强,同时受大气条件影响很大;LiDAR虽然监测精度高于微波和光学遥感,监测范围的灵活性也更强,但其受天气影响大,同时监测范围远不及光学和微波遥感.因此需要融合多种遥感数据,才能在监测地质灾害时做到互补.如何根据不同遥感数据的特点将多源遥感数据互补融合,将是未

来地质灾害遥感领域主要的研究方向之一.

(2)地质灾害隐患的监测中多源遥感数据的兼容.不同的遥感数据,其存储数据格式不同,时间和空间分辨率不同,成像原理等方面也不同,这导致了在使用多源数据的时候会遇到诸多不便.以光学遥感卫星为例:MODIS、ASTER、Sentinel-3、VIIRS等卫星传感器影像具有高的时间分辨率(1~2 d),但空间分辨率比较低(300~1 000 m);而SPOT、Landsat、Sentinel-2、GF系列具有高的空间分辨率(10~30 m),但时间分辨率低(无云情况下5~30 d).此外由于光学和微波遥感的成像方式不同,它们的图像数据不能在空间位置上一致.因此多源遥感数据如何兼容将是未来需要面临的一个问题.

(3)地质灾害的快速监测与自动预警.地质灾害具有突发性,而我国现在对于地质灾害预警工作的时效性还不够强,每年仍有大量的人员伤亡与财产损失,尤其是在目前调查工作尚未发现的地质灾害隐患地区.地质灾害虽然具有突发性,但已经有许多研究表明,在地质灾害发生前的一段时间,是可以监测到预警信号的.如:火山爆发之前可以用InSAR数据监测到火山口周围有明显的地表形变,并且可以通过热红外数据监测到温度的变化.如何准确识别预警信号,对于找到地质灾害隐患,提前进行地质灾害的防治有着巨大的意义.未来可以将深度学习与遥感技术相结合,实现自动识别地质灾害隐患,进行早期防治;实现自动监测地质灾害并发出警报,在地质灾害实时预警方面更进一步,保障人民的生命财产安全.

参考文献(References):

- [1]黄润秋.20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩石力学与工程学报,2007,26(3):433-454.
Huang R Q. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-454.
- [2]李媛,孟晖,董颖,等.中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(2):29-34.
Li Y, Meng H, Dong Y, et al. Main types and characteristics of geo-hazard in China: Based on the results of geo-hazard survey in 290 counties[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(2): 29-34.
- [3]中国地质灾害防治工程行业协会. T/CAGHP 001—2018 地质灾害分

- 类分级标准(试行)[S].
China Geological Disaster Prevention and Control Engineering Industry Association. T/CAGHP 001—2018 Standard of classification for geological hazards[S].
- [4]梅安新,彭望碌,秦其明,等.遥感导论[M].北京:高等教育出版社,2001.
Mei A X, Peng W L, Qin Q M, et al. An introduction to remote sensing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [5]郭华东.中国雷达遥感图像分析[M].北京:科学出版社,1999.
Guo H D. Analysis of radar remote sensing imagery in China[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [6]郭华东,邵芸,王长林,等.雷达对地观测理论与应用[M].北京:科学出版社,2000.
Guo H D, Shao Y, Wang C L, et al. Radar for earth observation: Theory and applications[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [7]邵芸,谢酬,张凤丽,等.雷达地质灾害遥感[M].北京:科学出版社,2021.
Shao Y, Xie C, Zhang F L, et al. Radar remote sensing of geological hazards[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)
- [8]邵芸,赵忠明,黄富祥,等.天空地协同遥感监测精准应急服务研究[M].北京:科学出版社,2020.
Shao Y, Zhao Z M, Huang F X, et al. Research on precise emergency service of space-air-ground cooperative remote sensing monitoring[M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)
- [9]邵芸,赵忠明,黄富祥,等.天空地协同遥感监测精准应急服务图集[M].北京:科学出版社,2020.
Shao Y, Zhao Z M, Huang F X, et al. Atlas on precise emergency service of space-air-ground cooperative remote sensing monitoring[M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)
- [10]Graham L C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping [J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(6): 763-768.
- [11]Wright T J, Parsons B, England P C, et al. InSAR observations of low slip rates on the major faults of western Tibet[J]. Science, 2004, 305(5681): 236-239.
- [12]范景辉,李梅,郭小方,等.基于PSInSAR方法和ASAR数据监测天津地面沉降的试验研究[J].国土资源遥感,2007(4): 23-27.
Fan J H, Li M, Guo X F, et al. A preliminary study of the subsidence in Tianjin area using ASAR images based on PSInSAR technique[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2007(4): 23-27.
- [13]Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1989, 94(B7): 9183-9191.
- [14]Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38 (5): 2202-2212.
- [15]Massonnet D, Briole P, Arnaud A. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry [J]. Nature, 1995, 375(6532): 567-570.
- [16]Dixon T H, Amelung F, Ferretti A, et al. Subsidence and flooding in New Orleans [J]. Nature, 2006, 441(7093): 587-588.
- [17]单新建,屈春燕,宋小刚,等.汶川 Ms 8.0 级地震 InSAR 同震形变场观测与研究[J].地球物理学报,2009, 52(2): 496-504.
Shan X J, Qu C Y, Song X G, et al. Coseismic surface deformation caused by the Wenchuan Ms 8.0 earthquake from InSAR data analysis [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(2): 496-504.
- [18]邵芸,谢酬,岳中琦,等.青海玉树地震差分干涉雷达同震形变测量[J].遥感学报,2010, 14(5): 1029-1037.
Shao Y, Xie C, Yue Z Q, et al. Co-seismic ground deformation of Yushu earthquake detected with D-InSAR technique [J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(5): 1029-1037.
- [19]Calais E, Freed A, Mattioli G, et al. Transpressional rupture of an unmapped fault during the 2010 Haiti earthquake [J]. Nature Geoscience, 2010, 3(11): 794-799.
- [20]Marshall S T, Funning G J, Owen S E. Fault slip rates and interseismic deformation in the western Transverse Ranges, California [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2013, 118(8): 4511-4534.
- [21]刘云华,汪驰升,单新建,等.芦山 Ms 7.0 级地震 InSAR 形变观测及震源参数反演[J].地球物理学报,2014, 57(8): 2495-2506.
Liu Y H, Wang C S, Shan X J, et al. Result of SAR differential interferometry for the co-seismic deformation and source parameter of the Ms 7.0 Lushan earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(8): 2495-2506.
- [22]Elliott J R, Walters R J, Wright T J. The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes[J]. Nature Communications, 2016, 7: 13844.
- [23]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 J H, Zhang L, Dong J, 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.
- [24]Hilley G E, Bürgmann R, Ferretti A, et al. Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis [J]. Science, 2004, 304(5679): 1952-1955.
- [25]廖明生,唐婧,王腾,等.高分辨率 SAR 数据在三峡库区滑坡监测中的应用[J].中国科学:地球科学,2012, 42(2): 217-229.
Liao M S, Tang J, Wang T, et al. Landslide monitoring with high-resolution SAR data in the Three Gorges region [J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(4): 590-601.
- [26]李梦华,张路,董杰,等.四川茂县岷江河谷区段滑坡隐患雷达遥感识别与形变监测[J].武汉大学学报(信息科学版),2021, 46

- (10): 1529–1537.
- Li M H, Zhang L, Dong J, et al. Detection and monitoring of potential landslides along Minjiang River valley in Maoxian County, Sichuan using radar remote sensing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1529–1537.
- [27]刘斌, 葛大庆, 李曼, 等. 地基 InSAR 技术及其典型边坡监测应用[J]. *中国地质调查*, 2018, 5(1): 73–81.
- Liu B, Ge D Q, Li M, et al. Ground-based interferometric synthetic aperture radar and its application in monitoring typical slopes[J]. *Geological Survey of China*, 2018, 5(1): 73–81.
- [28]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 Q, Dong X J, Li W L, et al. 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.
- [29]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 Z H, Song C, Yu C, 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.
- [30]王哲, 赵超英, 刘晓杰, 等. 西藏易贡滑坡演化光学遥感分析与 InSAR 形变监测[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(10): 1569–1578.
- Wang Z, Zhao C Y, Liu X J, et al. Evolution analysis and deformation monitoring of Yigong landslide in Tibet with optical remote sensing and InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1569–1578.
- [31]Massonnet D, Holzer T, Vadon H. Land subsidence caused by the East Mesa Geothermal Field, California, observed using SAR interferometry[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(8): 901–904.
- [32]Amelung F, Galloway D L, Bell J W, et al. Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation[J]. *Geology*, 1999, 27(6): 483–486.
- [33]Hoffmann J, Zebker H A, Galloway D L, et al. Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(6): 1551–1566.
- [34]吴立新, 高均海, 葛大庆, 等. 工矿区地表沉降 D-InSAR 监测试验研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2005, 26(8): 778–782.
- Wu L X, Gao J H, Ge D Q, et al. Experimental study on surface subsidence monitoring with D-InSAR in mining area[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2005, 26(8): 778–782.
- [35]王艳, 廖明生, 李德仁, 等. 利用长时间序列相干目标获取地面沉降场[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(2): 598–604.
- Wang Y, Liao M S, Li D R, et al. Subsidence velocity retrieval from long-term coherent targets in radar interferometric stacks[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(2): 598–604.
- [36]Chaussard E, Wdowinski S, Cabral-Cano E, et al. Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140: 94–106.
- [37]Tomás R, Romero R, Mulas J, et al. Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: A review of practical issues through cases in Spain[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(1): 163–181.
- [38]孙晓鹏, 鲁小丫, 文学虎, 等. 基于 SBAS-InSAR 的成都平原地面沉降监测[J]. *国土资源遥感*, 2016, 28(3): 123–129.
- Sun X P, Lu X Y, Wen X H, et al. Monitoring of ground subsidence in Chengdu Plain using SBAS-InSAR[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2016, 28(3): 123–129.
- [39]李金超. 基于 InSAR 和 Sentinel-1A 的淮南矿区形变灾害监测研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- Li J C. Study on deformation disaster monitoring in Huainan mining area based on In SAR and Sentinel-1A[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [40]Castañeda C, Gutiérrez F, Manunta M, et al. DInSAR measurements of ground deformation by sinkholes, mining subsidence, and landslides, Ebro River, Spain[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(11): 1562–1574.
- [41]Theron A, Engelbrecht J. The role of earth observation, with a focus on SAR interferometry, for sinkhole hazard assessment[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(10): 1506.
- [42]Amelung F, Jónsson S, Zebker H, et al. Widespread uplift and ‘trapdoor’ faulting on Galápagos volcanoes observed with radar interferometry[J]. *Nature*, 2000, 407(6807): 993–996.
- [43]Pritchard M E, Simons M. An InSAR-based survey of volcanic deformation in the central Andes[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2004, 5(2): Q02002.
- [44]Amelung F, Yun S H, Walter T R, et al. Stress control of deep rift intrusion at Mauna Loa volcano, Hawaii[J]. *Science*, 2007, 316(5827): 1026–1030.
- [45]Fournier T J, Pritchard M E, Riddick S N. Duration, magnitude, and frequency of subaerial volcano deformation events: New results from Latin America using InSAR and a global synthesis[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11(1): Q01003.
- [46]Ruch J, Wang T, Xu W B, et al. Oblique rift opening revealed by reoccurring magma injection in central Iceland[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12352.
- [47]Varugu B, Amelung F. Southward growth of Mauna Loa’s dike-like

- magma body driven by topographic stress [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 9816.
- [48] 谢酬, 李震, 李新武. 基于 PALSAR 数据的青藏高原冻土形变检测方法研究[J]. *国土资源遥感*, 2008(3): 15-19.
- Xie C, Li Z, Li X W. A study of deformation in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau based on ALOS/PALSAR D-InSAR interferometry [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2008(3): 15-19.
- [49] 李珊珊, 李志伟, 胡俊, 等. SBAS-InSAR 技术监测青藏高原季节性冻土形变[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(5): 1476-1486.
- Li S S, Li Z W, Hu J, et al. Investigation of the seasonal oscillation of the permafrost over Qinghai-Tibet Plateau with SBAS-InSAR algorithm[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(5): 1476-1486.
- [50] Daout S, Doin M P, Peltzer G, et al. Large-scale InSAR monitoring of permafrost freeze-thaw cycles on the Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(2): 901-909.
- [51] 王京. 基于多源 SAR 数据青藏高原冻土冻融过程及时空分布研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院空天信息创新研究院), 2021.
- Wang J. Freeze-thaw process and temporal-spatial distribution of permafrost based on multi-source SAR data over the Qinghai-Tibet Plateau [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Aerospace Information Research Institute, CAS), 2021.
- [52] 翟玮, 沈焕烽, 黄春林. 结合 PolSAR 影像纹理特征分析提取倒塌建筑物[J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(5): 975-982.
- Zhai W, Shen H F, Huang C L. Collapsed buildings extraction from the PolSAR image based on the analysis of texture features [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(5): 975-982.
- [53] 李强, 张景发. 高分三号卫星全极化 SAR 影像九寨沟地震滑坡普查[J]. *遥感学报*, 2019, 23(5): 883-891.
- Li Q, Zhang J F. Investigation on earthquake-induced landslide in Jiuzhaigou using fully polarimetric GF-3 SAR images[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(5): 883-891.
- [54] 郭华东, 王心源, 李新武, 等. 多模式 SAR 玉树地震协同分析[J]. *科学通报*, 2010, 55(13): 1195-1199.
- Guo H D, Wang X Y, Li X W, et al. Yushu earthquake synergic analysis using multimodal SAR datasets [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(31): 3499-3503.
- [55] 王治华. 大型个体滑坡遥感调查[J]. *地学前缘*, 2006, 13(5): 516-523.
- Wang Z H. Large scale individual landslide remote sensing[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(5): 516-523.
- [56] 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.
- Deng H. Application on investigation and evaluation of geohazard by high-precision satellite remote sensing technique [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [57] 黄润秋, 李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(12): 2585-2592.
- Huang R Q, Li W L. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan Earthquake on 12th May, 2008 [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(12): 2585-2592.
- [58] 彭令, 徐素宁, 梅建军, 等. 地震滑坡高分辨率遥感影像识别[J]. *遥感学报*, 2017, 21(4): 509-518.
- Peng L, Xu S N, Mei J J, et al. Earthquake-induced landslide recognition using high-resolution remote sensing images[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(4): 509-518.
- [59] 唐尧, 王立娟, 马国超, 等. 利用国产遥感卫星进行金沙江高位滑坡灾害灾情应急监测[J]. *遥感学报*, 2019, 23(2): 252-261.
- Tang Y, Wang L J, Ma G C, et al. Emergency monitoring of high-level landslide disasters in Jinsha River using domestic remote sensing satellites[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(2): 252-261.
- [60] 郭忻怡, 郭擎, 冯钟葵. 滑坡蠕变与遥感影像上植被异常关系[J]. *遥感学报*, 2020, 24(6): 776-786.
- Guo X Y, Guo Q, Feng Z K. Relationship between landslide creep and vegetation anomalies in remote sensing images [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(6): 776-786.
- [61] 龙玉洁, 李为乐, 黄润秋, 等. 汶川地震震后 10 a 绵远河流域滑坡遥感自动提取与演化趋势分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(11): 1792-1800.
- Long Y J, Li W L, Huang R Q, et al. Automatic extraction and evolution trend analysis of landslides in Mianyuan River basin in the 10 years after Wenchuan earthquake [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1792-1800.
- [62] 周学珍. 遥感技术在矿山地质灾害监测中的应用——以陕西神府煤矿区为例[J]. *能源环境保护*, 2013, 27(1): 52-55.
- Zhou X Z. Application of remote sensing technology to the monitoring of mine geological disaster: An example in Shenfu coal mine region in Shanxi [J]. *Energy Environmental Protection*, 2013, 27(1): 52-55.
- [63] Heap M J, Villeneuve M, Albino F, et al. Towards more realistic values of elastic moduli for volcano modeling[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2020, 390: 106684.
- [64] 黄磊, 李震. 光学遥感影像的山地冰川运动速度分析方法[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(5): 935-940.
- Huang L, Li Z. Mountain glacier flow velocities analyzed from satellite optical images [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(5): 935-940.
- [65] 许君利, 张世强, 韩海东, 等. 天山托木尔峰科其喀尔巴西冰川表面运动速度特征分析[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(2): 268-275.
- Xu J L, Zhang S Q, Han H D, et al. Change of the surface velocity of Koxkar Baxi glacier interpreted from remote sensing data, Tianshan

- Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 268-275.
- [66] Zhu X, Zhang R Z, Sun X W. Spatiotemporal dynamics of soil erosion in the ecotone between the Loess Plateau and western Qinling Mountains based on RUSLE modeling, GIS, and remote sensing[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(1): 33.
- [67] 王晓青, 魏成阶, 苗崇刚, 等. 震害遥感快速提取研究——以2003年2月24日巴楚-伽师6.8级地震为例[J]. *地学前缘*, 2003, 10(S1): 285-291.
- Wang X Q, Wei C J, Miao C G, et al. The extraction of seismic damage from remote sensing images: A case study of Bachu-Jiashi Earthquake with $M_s=6.8$ occurred on Feb. 24, 2003 [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(S8): 285-291.
- [68] 王福涛, 王世新, 周艺, 等. 高分辨率多光谱的芦山地震次生地质灾害遥感监测与评估[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(1): 181-185.
- Wang F T, Wang S X, Zhou Y, et al. High resolution remote sensing monitoring and assessment of secondary geological disasters triggered by the Lushan earthquake[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(1): 181-185.
- [69] 王晓青, 窦爱霞, 王龙, 等. 2013年四川芦山7.0级地震烈度遥感评估[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(1): 163-171.
- Wang X Q, Dou A X, Wang L, et al. RS-based assessment of seismic intensity of the 2013 Lushan, Sichuan, China M_s 7.0 earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(1): 163-171.
- [70] 范熙伟, 聂高众, 邓砚, 等. 基于无人机热红外遥感数据的地震倒塌房屋提取[J]. *地震地质*, 2021, 43(6): 1657-1670.
- Fan X W, Nie G Z, Deng Y, et al. Earthquake building damage detection using UAV thermal infrared remote sensing images [J]. *Seismology and Geology*, 2021, 43(6): 1657-1670.
- [71] 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.
- [72] 李维炼, 朱军, 朱秀丽, 等. 无人机遥感数据支持下滑坡VR场景探索分析方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(7): 1065-1072.
- Li W L, Zhu J, Zhu X L, et al. A exploratory analysis method of VR scene in landslide based on UAV remote sensing data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1065-1072.
- [73] 高冠杰, 侯恩科, 谢晓深, 等. 基于四旋翼无人机的宁夏羊场湾煤矿采煤沉陷量监测[J]. *地质通报*, 2018, 37(12): 2264-2269.
- Gao G J, Hou E K, Xie X S, et al. The monitoring of ground surface subsidence related to coal seams mining in Yangchangwan coal mine by means of unmanned aerial vehicle with quad-rotors[J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(12): 2264-2269.
- [74] 赵一鸣, 李艳华, 商雅楠, 等. 激光雷达的应用及发展趋势[J]. *遥测遥控*, 2014, 35(5): 4-22.
- Zhao Y M, Li Y H, Shang Y N, et al. Application and development direction of LiDAR[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2014, 35(5): 4-22.
- [75] 余金星, 程多祥, 刘飞, 等. 机载激光雷达技术在地质灾害调查中的应用——以四川九寨沟7.0级地震为例[J]. *中国地震*, 2018, 34(3): 435-444.
- She J X, Cheng D X, Liu F, et al. Application of airborne LiDAR technology in geological disaster investigation: Taking the Jiuzhaigou M_s 7.0 earthquake in Sichuan province as an example[J]. *Earthquake Research in China*, 2018, 34(3): 435-444.
- [76] 陈梦雪, 刘洪庆, 许世城. LiDAR技术在钱塘江海塘工程安全监测上的应用研究[J]. *测绘工程*, 2015, 24(9): 44-47.
- Chen M X, Liu H Q, Xu S C. Applied research of LiDAR technology in the safety monitoring of Qiantang River seawall construction [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2015, 24(9): 44-47.
- [77] 张永庭, 徐友宁, 梁伟, 等. 基于无人机载LiDAR的采煤沉陷监测技术方法——以宁东煤矿基地马连台煤矿为例[J]. *地质通报*, 2018, 37(12): 2270-2277.
- Zhang Y T, Xu Y N, Liang W, et al. Technical methods for colliery subsidence disaster monitoring using UAV LiDAR: A case study of the Maliantai colliery, Ningdong coal base, Ningxia [J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(12): 2270-2277.
- [78] 陈剑桥. 激光雷达在水土保持监测中的应用[J]. *水土保持通报*, 2007, 27(4): 15-17.
- Chen J Q. Lidar application to soil and water conservation monitoring [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(4): 15-17.
- [79] 米·阿森鲍姆, 彭嘉婷. 无人机载激光雷达在监测海岸侵蚀方面的应用——海岸线地形测量[J]. *中国测绘*, 2019(3): 80-82.
- Assenbaum M, Peng J T. Monitoring coastal erosion with UAV lidar [J]. *China Surveying and Mapping*, 2019(3): 80-82.
- [80] 邓明德, 崔承禹, 耿乃光. 遥感用于地震预报的理论及实验结果[J]. *中国地震*, 1993, 9(2): 163-169.
- Deng M D, Cui C Y, Geng N G. Application of principle of remote sensing to earthquake prediction and the experimental results [J]. *Earthquake Research in China*, 1993, 9(2): 163-169.
- [81] 单新建, 李建华, 马超, 等. 2001年昆仑山口西 M_s 8.1级地震地表破裂带遥感影像特征分析[J]. *地质学报*, 2005, 79(1): 132.
- Shan X J, Li J H, Ma C, et al. Analysis in remote sensing image features of surface rupture zone in the west of Kunlun Mountain Pass of M_s 8.1 Magnitude earthquake, 2001 [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(1): 132. (in Chinese)
- [82] 董秀军, 许强, 余金星, 等. 九寨沟核心景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.

- Dong X J, Xu Q, She J X, et al. Preliminary 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.
- [83] Roering J J, Stimely L L, Mackey B H, et al. Using DInSAR, airborne LiDAR, and archival air photos to quantify landsliding and sediment transport [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(19): L19402.
- [84] 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): 1342-1354.
- Lu H Y, Li W L, Xu Q, 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): 1342-1354.
- [85] 何倩, 范洪冬, 段晓晔, 等. 三维激光扫描与 DInSAR 联合监测矿区地表动态沉降方法 [J]. *煤矿安全*, 2017, 48(12): 70-73, 77.
- He Q, Fan H D, Duan X Y, et al. A combining method of 3D laser scanning and DInSAR for monitoring surface dynamic subsidence in Mining Area [J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(12): 70-73, 77.
- [86] Wang R, Wu K, He Q M, et al. A novel method of monitoring surface subsidence law based on probability integral model combined with active and passive remote sensing data [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(2): 299.
- [87] Francis P, Rothery D. Remote sensing of active volcanoes [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28: 81-106.
- [88] Pavez A, Remy D, Bonvalot S, et al. Insight into ground deformations at Lascar volcano (Chile) from SAR interferometry, photogrammetry and GPS data: Implications on volcano dynamics and future space monitoring [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(3): 307-320.
- [89] Käab A, Huggel C, Fischer L, et al. Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2005, 5(4): 527-554.
- [90] 吴立新, 李佳, 苗则朗, 等. 冰川流域孕灾环境及灾害的天空地协同智能监测模式与方向 [J]. *测绘学报*, 2021, 50(8): 1109-1121.
- Wu L X, Li J, Miao Z L, et al. Pattern and directions of spaceborne-airborne-ground collaborated intelligent monitoring on the geo-hazards developing environment and disasters in glacial basin [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(8): 1109-1121.

(上接第 442 页 /Continued from Page 442)

- [38] 陈剑科, 袁大刚, 晏昭敏, 等. 测色仪与中国标准土壤色卡测定土壤颜色比较——以川中丘陵区为例 [J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 78-89.
- Chen J K, Yuan D G, Yan Z M, et al. Comparison between colorimeter and new standard soil colour chart of China in determining Munsell color of soils: A case study of central Sichuan hilly region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 78-89.
- [39] Wang W, Zhao Y, Zhang T L, et al. Regional soil thickness mapping based on stratified sampling of optimally selected covariates [J]. *Geoderma*, 2021, 400: 115092.
- [40] Zhang S, Liu G, Chen S L, et al. Assessing soil thickness in a black soil watershed in northeast China using random forest and field observations [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(1): 49-57.
- [41] Scarpone C, Schmidt M G, Bulmer C E, et al. Modelling soil thickness in the critical zone for Southern British Columbia [J]. *Geoderma*, 2016, 282: 59-69.