

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.06-09

联合升降轨 InSAR 与高分辨率光学遥感的 滑坡隐患早期识别 ——以宁夏隆德为例

涂 宽¹, 王文龙^{2,3}, 谌 华¹, 李樵民^{2,3}, 耿 丹¹, 王 川¹, 郑 健¹, 杨 影¹

(1. 二十一世纪空间技术应用股份有限公司, 北京 100096; 2. 宁夏回族自治区遥感测绘勘察院
(宁夏回族自治区遥感中心), 宁夏银川 750021; 3. 高分辨率对地观测系统宁夏数据与应用
中心, 宁夏银川 750021)

摘要:宁夏隆德县地处六盘山西麓,地质条件复杂,受季节性强降雨影响,滑坡地质灾害频发,给当地人民生命财产安全造成了严重威胁。针对宁夏东部和南部植被覆盖率高的特点,文章利用合成孔径雷达升降轨差分干涉测量(Synthetic Aperture Radar Difference Interferometry, D-InSAR)技术与高分辨率光学遥感相结合,对隆德县展开滑坡隐患早期识别与探测研究。首先通过干涉叠加技术(Stacking)分别获得2019年1月—2020年5月隆德县升轨和降轨方向的雷达视向形变速率,然后结合高分辨率光学遥感影像产品和数字高程模型(DEM),基于专家判识经验建立适用于该研究区的滑坡隐患形态和变形解译标志,完成全县范围的滑坡隐患综合遥感识别和地面调查工作。本次遥感调查工作共识别滑坡隐患47处,野外调查验证21处,其中核实16处,准确率为71.4%。实地调查结果验证了综合遥感识别与探测技术在宁夏南部地质灾害隐患遥感调查的适用性和可行性,同时也验证了识别结果的准确性,为宁夏南部地区滑坡防治和突发地质灾害应急提供了重要的科学依据。

关键词:隆德县; 滑坡隐患识别; 升降轨结合; 差分干涉测量技术; 高分辨率光学遥感

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)06-0072-10

Early identification of hidden dangers of landslides based on the combination of ascending and descending orbits InSAR and high spatial resolution optical remote sensing: A case study of landslides in Longde County, southern Ningxia

TU Kuan¹, WANG Wenlong^{2,3}, CHEN Hua¹, LI Qiaomin^{2,3}, GENG Dan¹,
WANG Chuan¹, ZHENG Jian¹, YANG Ying¹

(1. Twenty First Century Aerospace Technology Co. Ltd., Beijing 100096, China.; 2. Ningxia Institute of Remote Sensing
Surveying and Mapping, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 3. Ningxia Data and Application Center of High Resolution
Earth Observation System, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Longde County in southern Ningxia is located at the western foot of Liupan mountain. Geological conditions is

收稿日期: 2021-02-09; **修订日期:** 2021-07-06

基金项目: 国家重点研发计划项目“星机协同的震后灾情信息快速动态调查技术系统”(2017YFC1500901); 宁夏科技厅重点研发计划项目“宁夏智慧遥感大数据服务平台关键技术研究及应用示范项目”(2020BFG92013)

第一作者: 涂 宽(1992-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事遥感地质、InSAR 地灾识别监测应用等方面的研究。E-mail: tukuan@21at.com.cn

通讯作者: 谌 华(1979-), 男, 博士, 研究员, 主要从事干涉 SAR、微波遥感器定标及 SAR 图像处理等方面的研究。E-mail: shenhua@21at.com.cn

complicated. Affected by seasonal heavy rainfall, landslides and geological disasters occur frequently in the area, which poses a serious threat to local people's lives and property. In consideration of the high fractional vegetation in study area, integrated remote sensing technologies combined of Synthetic Aperture Radar Difference Interferometry technology and high spatial resolution optical remote sensing have been used in early detection of Landslides in the Longde county. Stacking technology has been used to calculate the rate of deformation from 2019.01 to 2021.05, in the direction of ascending and descending orbit. Combining high spatial resolution optical remote sensing images and digital elevation model (DEM), the interpretation key of landslide in the area deformation has been established. Then the early detection of landslides and ground survey in Longde county have been done. Through the integrated remote sensing technologies, 47 landslides were detected. 21 landslides were surveyed by field, of which 16 were verified, with an accuracy rate of 71.4%. The results of field survey demonstrated the applicability and feasibility of integrated remote sensing technology in the detection of landslides in southern Ningxia. Meanwhile, and the accuracy of the results in Longde county has been testified. The results of the early detection through integrated remote sensing technology provided significant scientific bases for the landslide protection and emergency response to sudden geological disasters in southern Ningxia.

Keywords: Longde County; early detection of landslide; combined ascending and descending; synthetic aperture radar difference interferometry technology; high spatial resolution optical remote sensing

0 引言

固原市隆德县位于宁夏回族自治区最南部,面积为 992 km²,地处六盘山西麓,地势东高西低(图 1)。地貌主要以黄土丘陵为主,红层丘陵和中低山区主要分布在县域东部,河流阶地在区内少量发育,研究区地貌单元分布见图 2。区域地质资料显示,该区先后经历了燕山期和喜马拉雅期构造运动,地质构造复杂,广泛分布的黄土和红层残积土是区内主要的易滑地层,以滑坡、不稳定斜坡为主的地质灾害隐患多发,对当地人民的生命财产安全造成严重威胁,制约了当地经济发展^[1-2]。

因此,在该地区开展滑坡隐患调查,对提高当地地质灾害防治能力具有重要意义。

隆德县境内滑坡以黄土滑坡为主,岩质滑坡也有发育,多以坡面泥岩表层风化的残坡积物为主。滑坡规模以小型为主,中型、大型滑坡较少发育。不稳定斜坡指具备地质灾害发生的地质环境条件或已有变形迹象,未来可能发生滑坡、崩塌的斜坡体。前期该县地质灾害调查工作受技术条件和自然条件的限制,已调查的地质灾害隐患主要集中在道路两侧和人口聚集的河谷平原区,而中低山区、黄土丘陵区 and 红层丘陵区调查出的地质灾害隐患相对较少^[3]。

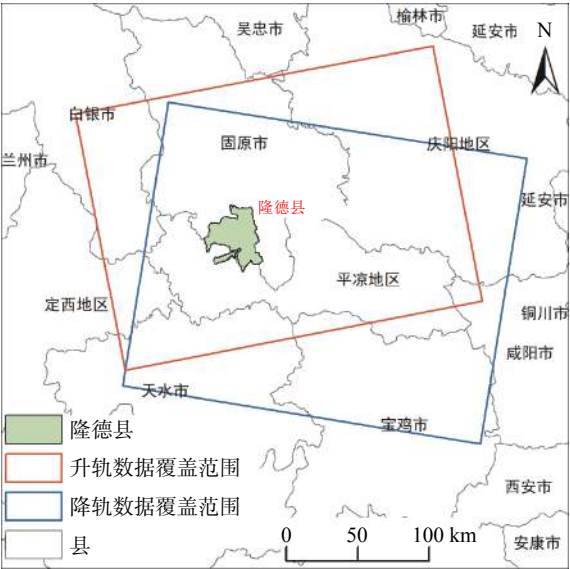


图 1 研究区位置及雷达卫星影像覆盖图

Fig. 1 Location of study area and coverage of radar satellite image

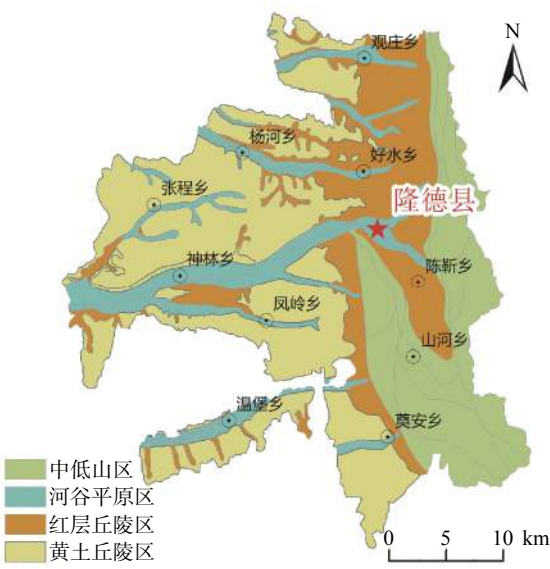


图 2 研究区地貌分布图

Fig. 2 Geomorph map in study area

地质灾害隐患通常指通过地形、地质和影响因素调查,初步推测可能发生地质灾害的地点或区段。传统的地质灾害识别工作多基于卫片、航片等遥感图像结合数字高程模型(DEM),采用人工判识手段,利用遥感图像的二维纹理、形态、颜色差异、地形地貌等特征实现对滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害的识别。较传统的地质灾害遥感识别,许强等学者提出利用高分辨率光学卫星遥感与 InSAR 技术相结合,充分利用地质灾害隐患在高分辨率光学遥感中的发育特征和 InSAR 获得的形变特征,基于隐患点在形态和形变上与周围环境的特征差异,结合专家经验,实现地质灾害隐患早期识别^[4-8]。

国际学者先后提出了干涉叠加技术(Stacking)^[9]和永久散射体技术(PS-InSAR)^[10-12]、小基线集干涉技术(SBAS-InSAR)^[13]、干涉点目标分析技术(IPTA)^[14]、分布式散射体技术(SqueeSAR)^[15]为代表的时序 InSAR 技术。时序 InSAR 技术通过提取多期雷达数据中的高相干点目标的时序相位信息进行分析 and 反演,获得高相干点目标的时序形变信息和形变速率,形变精度可达到毫米级^[16]。InSAR 技术具有全天时、全天候、覆盖广、精度高等优点,适合开展大范围地质灾害隐患普查工作,已广泛应用于滑坡隐患早期识别与形变监测中^[17-18]。但在实际应用中,受地形起伏、植被生长和土地耕作等影响,地表变化过快导致的失相干现象较为明显,尤其是在山区、丘陵等植被茂盛区域失相干现象会对 InSAR 形变获取造成较大影响。

宁夏隆德县东部地处六盘山西麓,植被覆盖较为茂盛,导致雷达图像失相干现象尤为明显。隆德县西部为宁南黄土区,气候干燥,该区域大气水汽活动不明显,对 InSAR 形变结果的影响较小。Stacking 技术相较于时序 InSAR 技术,不要求时间连续性构网,对数据的相干性需求较低,故能在隆德县取得较全的形变结果,且加权平均算法也能有效去除该区的大气相位等误差,快速获取地表形变。

哨兵一号(Sentinel-1A)C 波段 SAR 卫星,具有单星 12 天重返的稳定短重访观测优势,在隆德县范围具备升降轨道双向观测能力。C 波段 SAR 卫星能在隆德县干燥地表环境形变探测中取得较好结果。

受雷达卫星单侧视成像方式和山势地形地貌所限,雷达阴影的存在使得单轨雷达难以探测区域内全部滑坡隐患的形变信息,需要升降轨结合,对区域内滑坡隐患的探测才能更为全面,提高对多方向形变的滑坡隐患探测能力。

光学卫星遥感技术因其空间分辨率高、可判读性强、信息量丰富,已广泛应用于地质灾害调查和评价^[19]。其中亚米级高分辨率光学卫星遥感影像被广泛用于地质灾害隐患识别与监测^[20],结合数字高程模型可以对地质灾害隐患单体类型、活动性、承灾体、地表特征等信息进行提取,但该技术受解译人员的地质知识和背景影响且无法提供地表形变信息,难以定量确定隐患的活动性^[21]。因此需要将高分辨率光学遥感与 InSAR 技术相结合,对隐患进行综合遥感识别^[22-23]。

由于隆德县主要以滑坡地质灾害为主,所以聚焦滑坡隐患进行综合遥感识别。首次利用高分二号、北京二号卫星高分辨率光学遥感影像和升降轨 InSAR 技术。文章收集了升降轨道 Sentinel-1A 号雷达卫星数据,利用干涉叠加技术(Stacking),获取了宁夏回族自治区固原市隆德县升降轨 InSAR 形变结果。基于滑坡隐患在雷达升降方向的形变特征和地表形态学特征,结合专家经验识别滑坡隐患。再采用野外调查手段,对识别结果进行验证。相关结果已提交至自治区地质灾害监管单位,为当地地质灾害防治工作提供参考。

1 升降轨 InSAR 联合的地表形变探测技术

采用多轨道方向的 InSAR 形变探测与多时相高分辨率光学影像联合,综合专家判识的方法对研究区滑坡隐患进行早期识别。考虑隆德县东部六盘山中低区、中部和南部丘陵区的高植被覆盖导致的图像相干性较低对 InSAR 计算造成的影响,为降低图像失相干对形变结果准确性的影响,首先采用干涉叠加技术(Stacking)获得隆德县 2019—2020 年雷达视线方向形变速率。在此基础上结合多期高分辨率卫星影像,基于地灾隐患在光学遥感图像中的形态特征和多期变化特征,结合专家经验采用目视解译进行识别,对重点隐患点进行特征分析。

1.1 升降轨联合的多方向形变获取

雷达卫星为极轨卫星,飞行方向分为升轨和降轨方向。升轨为“自下而上”从东南向西北方向飞行;降轨为“自上而下”从东北向西南飞行。雷达卫星侧视成像工作模式在不同卫星的飞行方向上能获得不同卫星视向的地表形变信息,不同雷达视向探测到的地表形变量均为实际形变量在卫星视向的投影^[24]。受实际形变方向与雷达入视方向的角度影响,单一卫星飞行方向的形变探测必然会对部分形变方向不敏感。同时受山区地形起伏影响,单一卫星飞行方向难以探测雷达阴影与叠掩区域的有效形变信息^[25](图 3)。

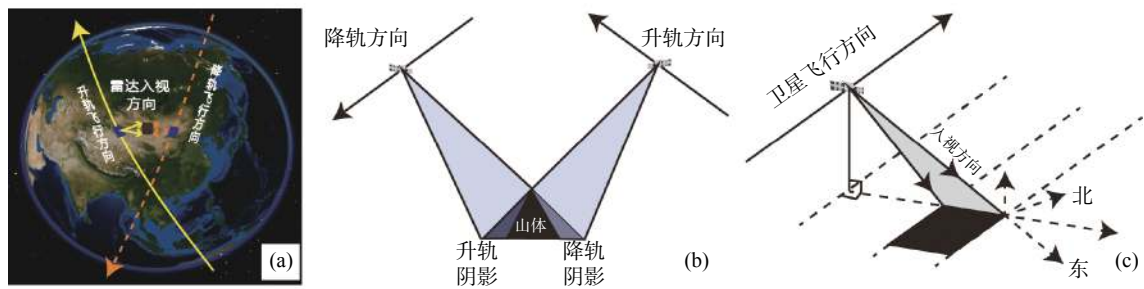


图 3 雷达卫星升降轨道成像模式图^[24-28]

Fig. 3 Working pattern of radar satellite from ascending and descending satellite orbits

结合卫星飞行轨道参数、雷达入射角和 DEM, 计算获得隆德地区 Sentinel-1A 卫星雷达升轨探测阴影与叠掩区域面积为 0.764 km², 降轨探测阴影与叠掩区域面积为 0.075 km²。雷达探测阴影与叠掩区域往往分布在地形起伏较大的区域, 多为地质灾害易发区域。升降轨联合共同阴影与叠掩区域面积为 0.012 km², 大大提高了单一轨道方向数据获取的效率。

结合雷达卫星在不同飞行方向探测的地表面形变量, 能有效补充单一轨道入射方向在雷达形变探测的无效区域和不敏感区域形变探测能力的不足, 更加充分和真实地反映地表面形变信息^[26-28]。

1.2 Stacking-InSAR 形变探测技术与采用的数据

(1) Stacking-InSAR 技术

干涉叠加技术(Stacking)由 PRICE 等^[29]提出, 假定地形误差及大气误差的随机性, 通过对同一地区多个解缠相位进行加权平均, 从而降低大气误差、地形残差及轨道误差。其数学模型为^[30]:

$$V_{\text{disp}} = \frac{\lambda \cdot \varphi_{\text{cum}}}{4\pi \cdot t_{\text{cum}}}$$

(1)

式中: V_{disp} ——平均形变速率;

λ ——波长;

φ_{cum} ——累积的相位;

t_{cum} ——累计时间和。

该方法能有效减少大气延迟、地形残差等因素的影响, 同时由于加权平均算法不要求观测点构网时间连续性, 大大降低了形变计算对相干性的要求, 能有效解决 PS-InSAR 等时序 InSAR 技术因时序高相干散射点较少而导致失相干问题, 提高了技术适用性。较之 PS-InSAR 等时序 InSAR 技术, 更适合自然场景的地表面

变计算。

文中利用 Sentinel-1A 卫星精密轨道和参考 DEM 数据, 去除地形相位和平地相位。采用空间域滤波抑制大气相位。首先对 Sentinel-1A 卫星数据按时间顺序排序的中间且当天天气晴朗无明显大气水汽变化的一期影像作为主影像进行配准; 完成各条带的拼接、去斜、裁剪等预处理工作; 设置合适的空间基线和时间基线阈值, 对时空阈值以内的影像进行组合并进行差分干涉, 生成干涉图; 然后引入外部 SRTM 30M DEM 进行差分干涉、去平、自适应滤波, 利用精密轨道文件和 DEM 基线轨道精炼; 利用最小费用流(Minimum Cost Flow, MCF)算法, 进行相位解缠; 采用空间域滤波分离大气水汽误差和地形残差; 筛选解缠图和差分图, 去除误差明显及解缠错误的像对; 最后采用 Stacking 处理, 对剩余像对进行加权平均处理, 获得平均形变速率。

(2) 采用的数据

本研究采用 Sentinel-1A 卫星合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)影像数据。考虑到研究区位于六盘山西麓, 地形起伏较大, 导致阴影、叠掩和透视收缩等几何畸变明显, 采用 Sentinel-1A 卫星升降轨数据进行形变计算, 数据覆盖情况如图 1 所示。采用 2019 年 1 月—2020 年 5 月共 85 期 Sentinel-1A 数据, 其中升轨影像为 42 期, 降轨影像 43 期。Sentinel-1A 号卫星基本参数详见表 1。此外获取研究区 SRTM 30M 数据作为参考 DEM, 用于在 InSAR 处理中去除地形误差, 结合精密轨道数据消除轨道误差。Sentinel-1A 号卫星轨道控制精确, C 波段在隆德县能保持较好的相干性, 故选用 200 m 空间基线, 50 d 的时间基线, 升降轨分别获得 162 组和 154 组干涉对。

表 1 Sentinel-1A 卫星属性
Table 1 Sentinel-1A satellite parameters

卫星名称	幅宽/km	入射角/(°)	极化方式	影像时间	影像数量
Sentinel-1A	250	29.1 ~ 46.0	双极化: HH+HV、VV+HH单极化: HH、VV	2019年1月—2020年5月	升轨42期降轨43期

2 升降轨 InSAR 探测结果

利用 Sentinel-1A 号卫星升降轨道数据, 获得研究区升降轨道两个方向的地表形变信息(图 4)。其中负值形变量代表沿着雷达视线方向(Line of Sight, LOS)方向远离卫星运动; 正值形变量代表沿着雷达视线方向靠近卫星运动。图 4(d)中黑色部分为山体阴影, 没有数据。

利用 Staking-InSAR 技术获得的隆德县升轨和降轨地表形变速率。其中升轨方向最大形变速率为 74 mm/a, 高形变区主要集中在东部的六盘山麓一带、北部红层丘陵和西部黄土区; 降轨方向最大形变速率为 52 mm/a, 高形变区主要集中在东部的六盘山麓、中西部丘陵一带。

3 基于专家判识的综合解译方法与采用的光学卫星遥感数据

3.1 综合遥感解译标志

(1) 变形特征解译标志

活动的滑坡及不稳定斜坡地质灾害隐患往往在 InSAR 形变结果上表现为聚集性的空间分布, 与周边环境存在明显差异, 形变主要集中在滑坡体的形变区域。滑坡的受力状态不同, 形变集中的位置也不相同。牵引式滑坡, 形变往往集中在滑坡前缘及坡脚, 而推移式滑坡形变往往集中在滑坡后缘。整体滑动往往在 InSAR 形变结果上表现为斜坡单元的整体性形变。InSAR 形变异常在形变图和相位图上, 均表现为高值区域(图 5)。

(2) 光学遥感解译标志

滑坡隐患是斜坡上的土体或岩体在降雨、地下水、河流冲刷、地震活动及人工因素等影响受到重力作用整体或分散地向下滑动的现象。滑坡隐患在影像上与周围地物相比具有明显的特征, 如形状、大小、色调、阴影、纹理、地形地貌、植被发育等(表 2)。滑坡隐患具体解译标志如下: 典型滑坡解译标志包括平面几何(簸箕形)、滑坡壁、滑坡台阶、滑坡鼓丘、封闭洼地、滑坡舌、滑坡裂缝等(图 5)。滑坡区内的湿地和泉水、醉汉林

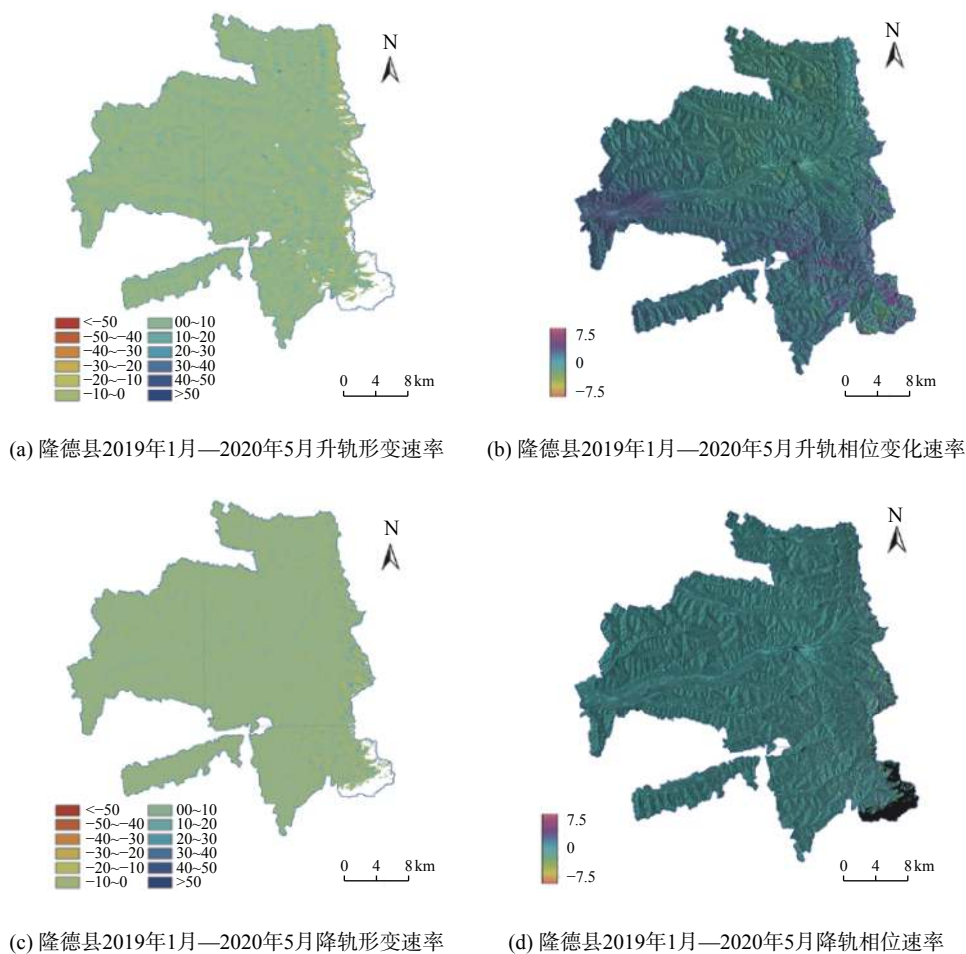


图 4 隆德县升降轨道 InSAR 形变图

Fig. 4 Annual deformation rate maps of InSAR in Longde County

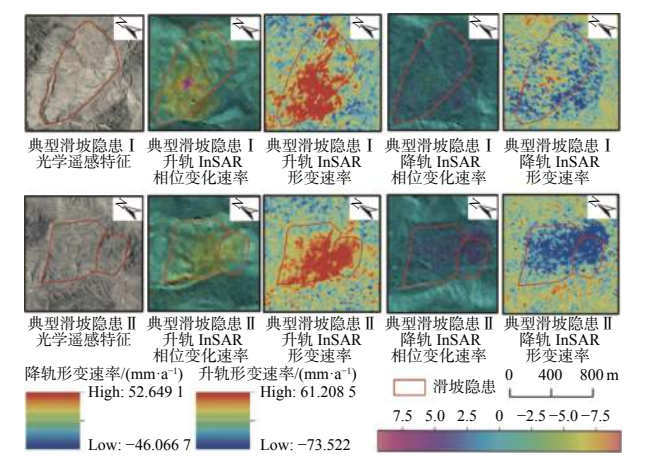


图 5 典型滑坡隐患遥感特征图

Fig. 5 The image characters of landslide

表 2 滑坡隐患光学遥感解译标志^[21,31-32]
Table 2 Interpretation key of landslide based on optical image

直接解译标志	表现	表现为圈椅、双沟同源、椭圆、长条、簸箕形、舌形、弧形、不规则多边形等。斜坡上部分坡体较周围地形平缓,但能与侵蚀平台、阶地等区分。
	颜色	滑坡体显浅色调,后缘弧形线性清晰,与外围深色调基岩反差明显。
	地形地貌	常分布在沟谷、河流等陡峭边坡的局部凹陷地段或河道偏移异常部位。滑坡体后缘发育有弧形异常影像,包括陡坎、地形变异常线和色调异常线等。滑坡体前缘边坡向谷地凸出,常有地形微突起及小型崩滑流堆积影像。
间接解译标志	水系特征	常形成相对独立封闭的汇水区 and 特殊的水网系统或发育有与邻近区域不协调的网纹结构,往往导致现代水系变迁等地形变异现象。

和马刀树等也是良好的解译标志。滑坡在地貌上有明显特征,逆向坡呈圈椅状地形。由于地形变凹,在色调上也由明显差异。滑坡在影像上的呈现为浅色调,滑坡体为暗色调。顺向坡多形成特殊的丘陵地形,坡面向低处弧形突起。一般在滑坡体的低洼部分,植被生成茂盛。

3.2 综合解译采用的光学卫星遥感数据

采用 2019 年高分二号(GF-2)1 m 分辨率卫星数据产品和 2020 年第 1 季度北京二号(BJ-2)卫星 0.8 m 数据产品进行综合遥感解译。高分二号卫星搭载 2 台高分辨率 1 m 全色像机、4 m 多光谱像机,具有亚米级空间分辨率、宽幅成像的优势^[33-34]。北京二号卫星由 4 颗高分辨率卫星组成,搭载 VHRI-100 成像仪在轨提供幅宽约 24 km、0.8 m 分辨率(Ground Sampling Distance, GSD)全色和 3.2 m 分辨率蓝、绿、红、近红外多光谱图像^[35]。

通过同区域多期次的高分辨率光学遥感数据产品,

结合该区域升降轨道方向的 InSAR 形变结果,基于变形解译标志和光学遥感解译标志,能对研究区滑坡隐患,确定隐患位置、类型、范围、活动特征、威胁对象及风险程度进行有效识别。

4 综合遥感滑坡隐患识别结果及野外验证情况

4.1 综合遥感滑坡隐患识别结果

利用差分干涉测量技术获得升轨和降轨两个轨道方向的 InSAR 平均形变速率,结合同区的亚米级分辨率光学遥感数据产品与数字高程模型,充分分析形变特征和形态特征,共识别疑似滑坡隐患 47 处(图 6)。所识别的滑坡隐患中,最大的滑坡平面面积为 62.49×10⁴ m²,最小的滑坡平面面积为 0.67×10⁴ m²,平面面积小于 1×10⁴ m² 的滑坡有 4 处,占总识别比例的 8.5%。滑坡隐患中最大视向形变速率为 15~39 mm/a,威胁对象包括当地居民、房屋、道路、农田、水库等。

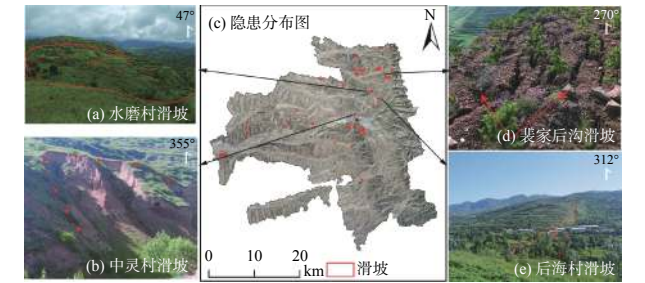


图 6 隆德县滑坡隐患分布图

Fig. 6 Distribution map of landslides in Longde County

滑坡隐患分布受地形地貌影响明显。隆德县地形东高西低,地貌类型随地势的起伏也不尽相同。主要类型为黄土丘陵、中低山区、河谷平原和红层丘陵四种(图 2)。根据隆德县地貌特征,可将其分为四个二级地貌单元;即中低山地貌、黄土丘陵地貌、红层丘陵地貌和河谷平原地貌。各二级地貌单元面积分别为:268.85 km²、411.99 km²、199.83 km² 和 111.72 km²,分别占总面积的 27.09%、41.51%、20.14%、11.26%。滑坡隐患主要分布在隆德县的北部、中部及西部,集中在红层丘陵区、河谷平原区、黄土丘陵区。隆德县南部及东侧六盘山地区因近年来封山育林,人类活动较少,不具备明显威胁对象条件,故该区域具备形变及形态特征的滑坡未被定为滑坡隐患。

4.2 野外验证结果

为了验证综合遥感技术识别的滑坡隐患的准确性与可靠性,联合宁夏回族自治区遥感测绘勘察院于 2020 年 7 月通过地面调查手段对所识别的 47 处滑坡隐

患中的 21 处进行地面调查验证。结果表明, 2 处隐患与当地工矿活动有关, 3 处滑坡隐患因现场植被覆盖茂密难以实地调查, 剩余 16 处所识别的滑坡隐患实地均存在不同程度的台坎、错动和拉裂, 部分现场照片见图 6。调查率达 44.7%, 调查准确率达 71.4%。隐患体滑动方向分布有房屋、道路、水利设施、农田等, 具备明显的威胁对象。

5 重点滑坡隐患分析

基于前文高分辨率光学遥感影像和 InSAR 形变结果的综合遥感识别和地面调查的结果, 结合滑坡隐患地形、地貌、水文特征, 对后海村和水磨村重点滑坡隐患进行详细分析。

5.1 后海村滑坡隐患

地处红层丘陵区地貌单元, 后海村北部, 位于较陡峻的山坡地段, 表面植被覆盖度低, 下方威胁多户民房。从高分辨光学影像产品中可见后海村滑坡呈扇形, 自北东向南西方向滑动, 面积约 $10.9 \times 10^4 \text{ m}^2$, 轴长约 730 m, 最大弦长约 250 m, 左右两侧冲沟发育, “双沟同源”特征明显, 有前缘有明显拉裂缝(图 7)。后海村滑坡在升轨 InSAR 形变结果中表现为明显异常。雷达视向形变主要集中在滑坡右侧及前缘, 升轨方向最大形变速率为 51 mm/a, 后侧形变不明显, 推测该滑坡隐患为牵引式滑动。受局部地形与卫星飞行方向影响, 相较于升轨形变结果, 后海村滑坡在降轨形变结果虽具有一定程度形变, 但与周边环境差异不明显。

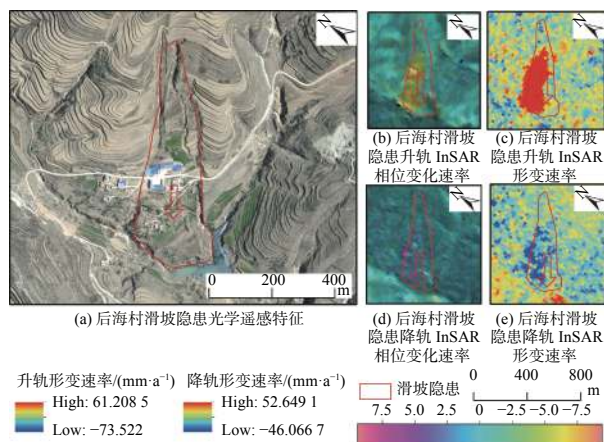


图 7 后海村滑坡隐患遥感特征图

Fig. 7 Remote sensing feature of landslide in Houhai Village

现场调查发现, 该滑坡主要由黄土组成, 为典型的黄土滑坡, 侧缘明显且发育多级台阶(图 6e), 前缘有明显的拉张裂缝宽约 50 cm、下挫约 30 cm, 同时坡体内房

屋结构可见明显剪裂。

5.2 水磨村滑坡隐患

地处红层丘陵区地貌单元, 水磨村西部, 位于陡峻的山坡地段, 表面植被覆盖度低。从北京二号高分辨率卫星影像产品可见, 该滑坡隐患自西北向东南滑移, 呈扇形展布, 面积约为 $18.7 \times 10^4 \text{ m}^2$, 半径约为 500 m, 最大弦长约为 600 m, 坡体破碎明显, 左右两侧冲沟明显, 具备明显的“双沟同源”和滑坡台阶, 后分块体崩落, 下方威胁水库。在雷达升降轨 InSAR 形变结果中均表现为明显异常(图 8), 形变高异常区域集中在滑坡后侧, 升轨最大视向形变速率为 73 mm/a, 判断该滑坡隐患为推动式滑坡。

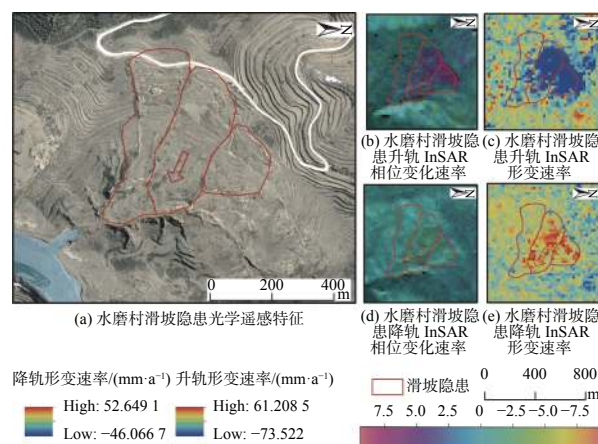


图 8 水磨村滑坡隐患遥感特征图

Fig. 8 Remote sensing feature of landslide in Shuimo Village

现场调查发现, 该滑坡存在多级滑坡台阶, 后部块体下挫明显, 垂向位移约有 2m, 前缘临水库。坡体上分布多条冲沟, 将坡体切割为多个块体, 部分块体有明显崩落。坡体呈现多个低于周边原坡面的簸箕状洼地, 部分树木向坡后侧倾倒, 局部出现坡内反倾地形。

5.3 形变综合分析

部分滑坡隐患在雷达升降轨方向 InSAR 形变结果中均有明显反映, 如后海村滑坡和水磨村滑坡(图 7 和图 8); 部分滑坡隐患只在单一轨道方向 InSAR 结果中有显示明显的形变异常, 如重点滑坡隐患 I(图 5)。受地形坡度、坡向、卫星飞行方向和雷达照射方向的影响, 滑坡真实形变在不同轨雷达入视方向投影量不同, 导致不同轨道方向对同一滑坡隐患的形变探测敏感性不同。所以在实际隐患识别工作中, 需要对升降轨道任一方向的雷达形变异常进行综合分析。

为更好分析升降轨雷达卫星双向形变探测结果, 基于卫星飞行方向、轨道高度、入射角等信息结合 DEM

数据,利用空间三角函数将雷达升降轨道两个入视方向形变量投影至斜坡坡向^[36]。本文以后海村滑坡隐患和水磨村滑坡隐患为例,将雷达视向形变投影至沿坡向(图9)。前海村滑坡隐患坡、水磨村滑坡隐患升降轨两个方向在沿坡向的形变均很明显,与周围环境形变特征存在明显差异,但升降轨道卫星探测的形变结果在沿坡向的形变值上依然存在较大差异。

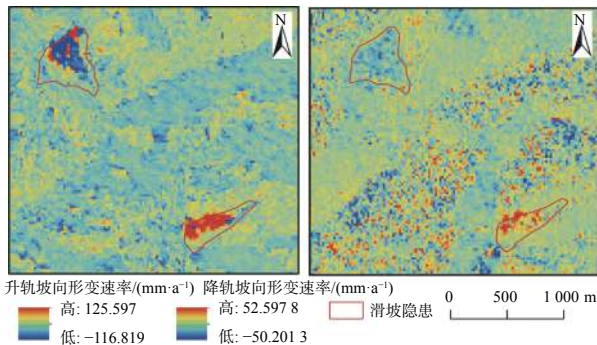


图9 前海村和水磨村滑坡隐患坡向形变图

Fig. 9 Deformation in slope direction(Houhai Village and Shuimo Village)

6 结论

(1)升降轨双向 InSAR 能有效实现多方向的地表形变探测,在减少单一雷达方向的地形遮挡区域的同时,提高对不同滑移方向滑坡隐患形变探测敏感性。

(2)高分辨率光学遥感影像能有效反映滑坡隐患形态发育特征,获取了滑坡隐患的位置、范围、威胁对象等单体形态特征和承灾体特征。结合 DEM 产品,能有效排除由地形、大气及人类工程活动等多种因素造成的 InSAR 伪形变对滑坡隐患识别造成的影响。

(3)文章采用综合遥感技术,实现了宁夏南部隆德县全域滑坡隐患综合遥感识别。利用升降轨干涉叠加技术获得了隆德县全域 2019 年 1 月—2020 年 5 月的升降轨两个方向的形变速率,建立了适用于研究区滑坡隐患识别的综合遥感解译标志,通过变形特征与该区域高分辨率光学影像所反映的滑坡形态特征,共同识别了疑似滑坡隐患 47 处并查明威胁对象,野外调查验证 21 处,其中核实 16 处,准确率为 71.4%,在证明识别结果的准确性的同时也验证了综合遥感识别技术在该区域的适用性和可行性,为同类应用提供参考依据。

参考文献 (References) :

[1] 高丽琰,余江宽,张幼莹,等.基于GIS的层次分析法在宁夏地质灾害易发性评价的应用[J].防灾科技学院学

报,2017,19(4):8-15. [GAO Liyan, YU Jiangkuan, ZHANG Youying, et al. Application of GIS-based analytic hierarchy process in geological hazards assessment in Ningxia region [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2017, 19(4): 8-15. (in Chinese with English abstract)]

[2] 王成,孟方,李天斌.宁夏回族自治区区域地质志[R].银川:宁夏回族自治区地质调查院,2013:23-30. [WANG Cheng, MENG Fang, LI Tianbin. Regional geology of the Ningxia Hui Autonomous Region [R]. Yinchuan: Geology Survey Institute of Ningxia, 2013: 23-30. (in Chinese)]

[3] 吕世民,吴凯,杜光波,等.宁夏隆德县地质灾害发育特征及形成条件分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(6):42-47. [LYU Shimin, WU Kai, DU Guangbo, et al. Development characteristics and formation conditions of geological hazards in Longde County of Ningxia [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, 13(6): 42-47. (in Chinese with English abstract)]

[4] 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 portential catastrophic geohazards [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957-966. (in Chinese with English abstract)]

[5] 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. (in Chinese with English abstract)]

[6] 葛大庆.地质灾害早期识别与监测预警中的综合遥感应用[J].城市与减灾,2018(6):53-60. [GE Daqing. Comprehensive application of remote sensing in early identification, monitoring and early warning in geological disasters [J]. City and Disaster Reduction, 2018(6): 53-60. (in Chinese with English abstract)]

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

[8] 葛大庆,郭兆成.重大地质灾害隐患早期识别中综合遥

- 感应用的思考 [J]. *中国应急救援*, 2019(1): 10–14. [GE Daqing, GUO Zhaocheng. Thoughts of early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies [J]. *China Emergency Rescue*, 2019(1): 10–14. (in Chinese with English abstract)]
- [9] ZEBKER H A, ROSEN P A. Atmospheric artifacts in interferometric SAR surface deformation and topographic maps [J]. Department of Electrical Engineering and Geophysics, University of Stanford, Stanford, CA. 1996.
- [10] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8–20.
- [11] COLESANTI C, FERRETTI A, NOVALI F, et al. SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(7): 1685–1701.
- [12] 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.
- [13] LANARI R, MORA O, MANUNTA M, et al. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(7): 1377–1386.
- [14] WERNER C, WEGMULLER U, STROZZI T, et al. Interferometric point target analysis for deformation mapping[C]//IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477). July 21–25, 2003, Toulouse, France. IEEE, 2003: 4362–4364.
- [15] FERRETTI A, FUMAGALLI A, NOVALI F, et al. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(9): 3460–3470.
- [16] 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 remote sensing to landslide detection and monitoring: Challenges and solutions [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 967–979. (in Chinese with English abstract)]
- [17] FRUNEAU B, ACHACHE J, DELACOURT C. Observation and modelling of the Saint-Étienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry [J]. *Tectonophysics*, 1996, 265(3/4): 181–190.
- [18] RAUCOULES D, MAISONS C, CARNEC C, et al. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88(4): 468–478.
- [19] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 张幼莹, 余江宽, 步凡, 等. “高分二号”卫星在黄土地质灾害解译中的应用研究 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2017, 40(11): 31–34. [ZHANG Youying, YU Jiangkuan, BU Fan, et al. Application of GF-2Satellite to geological hazard interpretation in loess plateau [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2017, 40(11): 31–34. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 彭令, 徐素宁, 梅军军, 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 Ling, XU Suning, MEI Junjun, et al. Earthquake-induced landslide recognition using high-resolution remote sensing images [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(4): 509–518. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 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 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): 1342–1354. (in Chinese with English abstract)]
- [23] CARLÀ T, INTRIERI E, RASPINI F, et al. Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 14137.
- [24] DIAO X P, WU K, HU D H, et al. Combining differential SAR interferometry and the probability integral method for three-dimensional deformation monitoring of mining areas [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(21): 5196–5212.
- [25] 刘星洪, 姚鑫, 周振凯, 等. 滑坡灾害InSAR应急排查技术方法研究 [J]. *地质力学学报*, 2018, 24(2): 229–237. [LIU Xinghong, YAO Xin, ZHOU Zhenkai, et al. Study of the technique for landslide rapid recognition by InSAR [J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24(2): 229–237. (in Chinese

- with English abstract)]
- [26] HU J, LI Z W, DING X L, et al. Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: a review [J] . *Earth-Science Reviews*, 2014, 133: 1 – 17.
- [27] HU X, WANG T, PIERSON T C, et al. Detecting seasonal landslide movement within the Cascade landslide complex (Washington) using time-series SAR imagery [J] . *Remote Sensing of Environment*, 2016, 187: 49 – 61.
- [28] ERIKSEN H Ø, LAUKNES T R, LARSEN Y, et al. Visualizing and interpreting surface displacement patterns on unstable slopes using multi-geometry satellite SAR interferometry (2D InSAR) [J] . *Remote Sensing of Environment*, 2017, 191: 297 – 312.
- [29] PRICE E J, SANDWELL D T. Small-scale deformations associated with the 1992 Landers, California, earthquake mapped by synthetic aperture radar interferometry phase gradients [J] . *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 1998, 103(B11): 27001 – 27016.
- [30] STROZZI T, WEGMULLER U, WERNER C, et al. Measurement of slow uniform surface displacement with mm/year accuracy[C]//IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No. 00CH37120). July 24-28, 2000, Honolulu, HI, USA. IEEE, 2000: 2239-2241.
- [31] 彭令,徐素宁,梅建军,等.资源三号卫星在汶川震区滑坡快速识别中的应用方法研究 [J] . *遥感技术与应用*, 2018, 33(1): 185 – 192. [PENG Ling, XU Suning, MEI Junjun, et al. Research on Wenchuan earthquake-induced landslides rapid recognition from ZY-3 imagery [J] . *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(1): 185 – 192. (in Chinese with English abstract)]
- [32] CASCINI L, FORNARO G, PEDUTO D. Advanced low- and full-resolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales [J] . *Engineering Geology*, 2010, 112(1/2/3/4): 29 – 42.
- [33] 董文,潘建平,阳振宇,等.高分二号卫星数据在地质灾害调查中的应用:以重庆万州区为例 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(1): 106 – 111. [DONG Wen, PAN Jianping, YANG Zhenyu, et al. Application of GF-2 satellite data in geological hazard survey: A case study in Wanzhou district of Chongqing City [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(1): 106 – 111. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 潘腾. 高分二号卫星的技术特点 [J] . *中国航天*, 2015(1): 3 – 9. [PAN Teng. The technology characteristics of Gaofen-2 satellite [J] . *Aerospace China*, 2015(1): 3 – 9. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 王智勇,文强,李晶晶,等.从开拓到引领:赋能国内商业遥感卫星运行服务 [J] . *中国测绘*, 2019(10): 28 – 30. [WANG Zhiyong, WEN Qiang, LI Jingjing, et al. From pioneering to leading: Enabling domestic commercial remote sensing satellite operation services [J] . *China Surveying and Mapping*, 2019(10): 28 – 30. (in Chinese with English abstract)]
- [36] ZHANG Y, MENG X M, JORDAN C, et al. Investigating slow-moving landslides in the Zhouqu region of China using InSAR time series [J] . *Landslides*, 2018, 15(7): 1299 – 1315.