DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2020.02.009

陆超然[1]　蔡杰华[1]　刘东烈[2]　郭金城[2]　董杰[3]　廖明生[1]

基于卫星 InSAR 技术的地质灾害隐患点探测与形变分析

摘要

地质灾害的频繁发生直接或间接地给自然环境和社会带来了不可逆转的巨大危害,近年来我国也在不断加强地质灾害早期识别和防治的力度.合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术以其全天时、全天候、高精度、大范围监测的优势,成为一种重要的形变监测手段.本文以贵州省黔东南州地质灾害隐患排查为例,采用差分干涉测量(D-InSAR)和小基线集(SBAS)时序 InSAR 技术分别处理了 ALOS-2/PALSAR-2 和 Sentinel-1 雷达数据.选取具有代表性的 4 个隐患点区域重点讨论,结果展示了 D-InSAR 在大范围地表形变探测以及 SBAS 在高精度形变监测中的优势,同时表明两种方法在地质灾害隐患普查中可以互相补充,提升地灾隐患的识别能力.此外,获取的隐患点雷达视线方向累积形变序列和平均形变速率,可为贵州省地质灾害防灾减灾提供有价值的参考.

关键词

贵州黔东南州;地质灾害;差分干涉测量;小基线集;时序形变分析

中图分类号 P237

文献标志码 A

收稿日期 2019-10-20

资助项目 国家自然科学基金青年基金(41904001);中国博士后科学基金第 64 批面上资助(2018M640733);武汉大学自主科研项目(2042019kf0048);测绘遥感信息工程国家重点实验室开放基金(18R03)

作者简介

陆超然,女,硕士生,研究方向为雷达干涉测量.chaoranlu@ whu.edu.cn

廖明生(通信作者),男,博士,教授,主要研究方向为雷达遥感.liao@ whu.edu.cn

1　武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉,430079

2　贵州省第一测绘院,贵阳,550025

3　武汉大学 遥感信息工程学院,武汉,430079

0　引言

我国是世界上受地质灾害影响最严重的国家之一[1],贵州省是我国地质灾害发生最为频繁的省份之一.复杂的地理环境、强烈的地质构造以及湿润的气候条件是贵州地质灾害频发的主要原因,近年来频繁的人类经济建设活动同时加剧了地质灾害的发生[2].据贵州省政府办公厅印发的《2019 年度贵州省地质灾害防治工作方案》,截至 2018 年底,贵州省地质灾害高中易发区面积达 13.6 万 km^2,占全省国土面积的 77%,受地质灾害威胁人数 145 万人,潜在经济损失约 410 亿元.近年来,提升地质灾害监测预警能力得到了国家的高度重视与支持.

地质灾害的孕育和发生往往表现为地表的形变,如何准确、迅速地探测地表形变成为地灾早期识别的关键技术.目前,地表形变监测已发展出多种技术手段:传统的水准测量、GPS、伸缩计等仅能针对已知的形变体进行稀疏的点观测,不能整体地反映形变情况,在山区,仪器的布设也存在诸多困难;光学遥感无法有效地探测缓慢形变,且易受到云雾等不良天气状况的影响;激光雷达测量可以高精度、详细地展现地表的三维形变,适用于范围较小的监测目标;合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar,InSAR)克服了上述技术存在的局限性,实现了全天时、全天候、高精度、大范围的地表形变测量,为地质灾害早期识别提供了有效的技术手段[3].

雷达差分干涉测量(Differential InSAR,D-InSAR)是在 InSAR 基础上发展起来的常规处理手段,已成熟应用于地震[4]、矿区沉降[5]等由于自然或人为作用引发的地质灾害.但时空去相干和大气相位延迟差异引起的相位噪声,制约了 D-InSAR 技术的应用,此外,DEM 误差也会干扰地表缓慢位移信号的提取,这些因素的共同作用影响了 D-InSAR 技术提取形变信息的准确性[6].时间序列 InSAR 在此背景下应运而生.选取时序 SAR 影像上受时空去相干及大气延迟影响较小的永久散射体(Permanent Scatter,PS),构建“天然 GPS 网”,通过对离散的 PS 点进行相位分析,可以分离出各信号的相位分量,估算出视线向形变速率、DEM 误差以及大气相位,实现高精度的地表形变连续监测[7].常见的时序 InSAR 可分为永久散射体干涉测量(Permanent

Scatter Interferometry,PSI)[8]和小基线集方法(Small Baseline Subsets,SBAS)[9].PSI 技术以单一的公共主影像进行干涉处理,对地面目标的稳定性要求高,广泛应用于人工建筑较密集的城市区域[10].但在高植被覆盖度的山区,干涉对的相干性随着时间基线的增加迅速降低,相干点数量往往无法满足监测要求.SBAS 技术通过限制时间基线和空间基线的阈值,构建多主影像的干涉对序列,从而降低时空失相干的影响,该方法在地表沉降[11]、滑坡监测[12]等方面具有较大的优势.

本文结合 D-InSAR 和时序 InSAR 技术对贵州黔东南州进行了大范围地灾隐患点探测:D-InSAR 用于大范围的定性普查,大大降低时序处理运算量,SBAS 时序 InSAR 针对 D-InSAR 的普查结果进行核查和详查.通过两种技术监测结果的对比,分析二者在山区形变探测中的优势和劣势,论证结合两种方法在地灾隐患普查中的可行性,并利用 SBAS 技术获取形变体的累积形变量及年平均形变速率,为后期隐患点的现场核查提供技术支持.

1 技术路线

基于卫星 InSAR 技术的地质灾害隐患点探测与形变分析可概括为"三查"——大规模普查、重点详查以及隐患点核查,充分利用了差分干涉测量和时序 InSAR 的优势,为后续地面核查提供可靠的雷达遥感监测结果,其技术流程如图 1 所示.

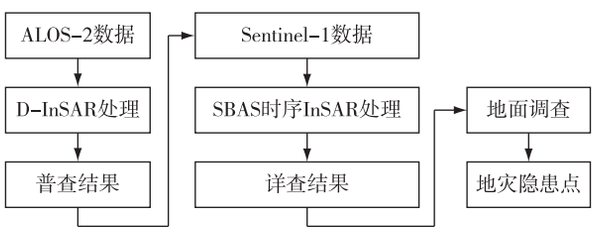


图 1 基于 InSAR 技术的地质灾害隐患点探测技术流程

Fig. 1 Flow chart for detection of potential geological hazard points using InSAR technique

1.1 D-InSAR:普查

差分干涉测量通过两次或多次干涉测量获取地表相位信息,去除干涉相位中的地形相位等,大规模获取地表在观测时间间隔内的形变信息.在 D-InSAR 的实际应用中,通常会引入外部 DEM,采用二轨法[13]去除地形相位.

由于研究区域的植被覆盖度高,C 波段数据集干涉结果无法保持很好的相干性,干涉条纹受噪声影响大,增加了正确相位解缠和形变探测的难度[14].波长更长的 L 波段雷达数据集在高植被覆盖度的山区表现得更加稳健,在相同时间间隔内,能保持更好的干涉质量.

1.2 时序 InSAR:详查

SBAS 技术在山区时序 InSAR 监测中应用广泛,它根据各相位分量的特征,对每个相干点进行时间域和空间域的相位分析,估计出大气延迟相位、DEM 误差导致的地形残余相位以及去相关噪声相位[15],获取高精度的、可靠的时序形变结果.

由于 SBAS 技术需要大量时间序列的 SAR 历史数据,多数商业 SAR 卫星在研究区域的累积数据不足以满足时序形变信息的反演.Sentinel-1 卫星的长期观测计划及其完全开放且免费的数据政策[16],为我们提供了充足的连续观测数据.较短的观测时间间隔确保了相干点的相对稳定性,进一步降低了对波长的要求,C 波段的 Sentinel-1 数据集可以满足该地区的时序监测要求.

1.3 地面调查:核查

在 D-InSAR 和 SBAS 技术获取的地灾隐患点探测结果的基础上,进一步开展实地调查,对隐患点进行核查和综合分析,判定隐患点的危险性,继而进行高精度的定点监测.同时对雷达差分干涉测量技术探测结果进行验证和补充,逐步提升地质灾害早期识别精度.

2 研究区及数据源

2.1 研究区概况

黔东南苗族侗族自治州地处云贵高原向湘西丘陵及广西盆地过渡的斜坡地带,地势西高东低,地形起伏较大,海拔在 100~2 200 m 之间,坡度主要分布在 5°~25°,以喀斯特地貌为主,水系发达,降水丰富.受脆弱的自然地理条件和强降雨的影响,黔东南州大部为地质灾害多发易发区.地灾的发生具有明显的季节性,多发生于汛期(5—9 月),同时与人为工程活动联动,给人民生命财产安全带来巨大威胁.据统计,截至 2017 年末,全州共查明地质灾害隐患点 1 672 处,主要类型为滑坡、泥石流、崩塌、不稳定斜坡等.

基于黔东南州地灾 InSAR 识别结果,结合地表覆盖情况,本文选取了 4 个具有代表性的地灾隐患区域进行 D-InSAR 普查和 SBAS 时序分析,分别位于台江县革一乡、凯里市城区和剑河县革东镇,研究

区域如图 2 所示,其中 P3 与 P4 区域距离较近.

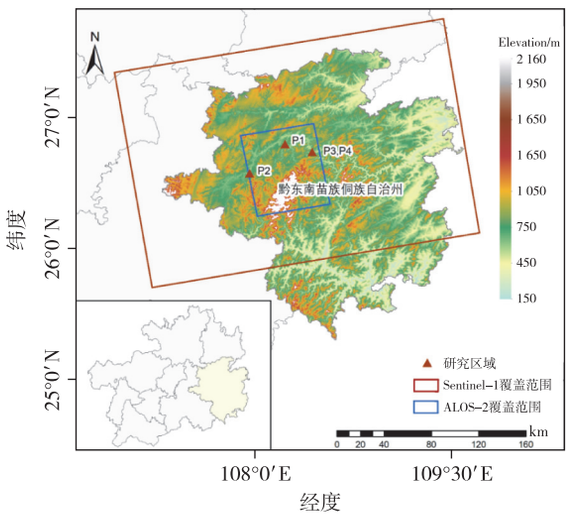


图 2　研究区域及数据覆盖范围

Fig. 2　Research area and SAR datasets coverage

2.2　数据源

选取了 6 景 ALOS-2/PALSAR-2 的 Stripmap 模式数据,33 景 Sentinel-1 干涉宽幅模式数据.实验数据覆盖范围如图 2 所示,其中蓝色框为 ALOS-2 数据覆盖范围,红色框为 Sentinel-1 数据覆盖范围.两组 SAR 数据集的相关参数如表 1 所示.数字高程模型采用的是美国国家航空航天局发布的 SRTM 90 m 分辨率数据[17].

表 1　SAR 数据参数

Table 1　Parameters of SAR datasets

参数	ALOS-2/PALSAR-2	Sentinel-1
波段	L 波段	C 波段
波长/cm	23.6	5.6
轨道方向	升轨	升轨
平均入射角/(°)	36.2	39.3
距离向×方位向分辨率	3 m×3 m	5 m×20 m
影像数量/景	6	33
时间跨度	2018-12-07—2019-09-05	2018-08-02—2019-09-08

3　结果与分析

对 6 景 ALOS-2/PALSAR-2 数据进行差分干涉处理,用于前期的大范围普查,确定疑似形变点的位置及范围.随后,针对 D-InSAR 探测的疑似形变点,采用 StaMPS-SBAS[15] 方法对小范围区域进行时序分析处理,结合时间基线、空间基线以及相干程度 3 个指标组合生成了 74~90 幅干涉图,经时序分析获取疑似形变点的累积形变序列和平均形变速率.通过对比 4 个研究区域的探测结果,分析 2 种方法优势、劣势及应用场景,论证 InSAR 技术在地质灾害隐患普查中的可行性.

3.1　D-InSAR 与时序 InSAR 结果对比分析

1)P1 区域

根据 2018 年 12 月 27 日与 2019 年 3 月 21 日的 ALOS-2 差分干涉结果,台江县革一乡境内镇远—台盘公路行进方向左侧的边坡(P1)表现为远离卫星方向的相位(图 3).虽然该边坡已进行了加固防护,但仍可能发生缓慢滑移.

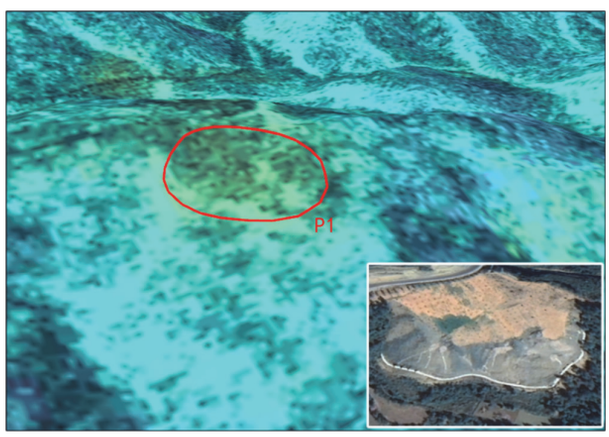


图 3　P1 区域 D-InSAR 监测结果

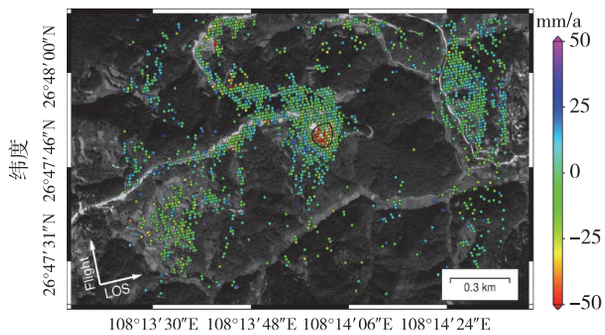
Fig. 3　D-InSAR result for area P1

P1 区域的 SBAS 时序处理结果如图 4 所示,从图 4a 中可以看出加固边坡 P1 区域相对于周边区域存在远离卫星的趋势,印证了 D-InSAR 的探测结果.在该边坡上选取 4 个相干点,计算其周围 20 m 范围内所有点的平均累积形变序列.图 4b 中各组累积形变序列差异不大,且存在明显的线性滑动趋势,滑动速率为 5 cm/a.经地面核查,该边坡确定发生了缓慢滑移.

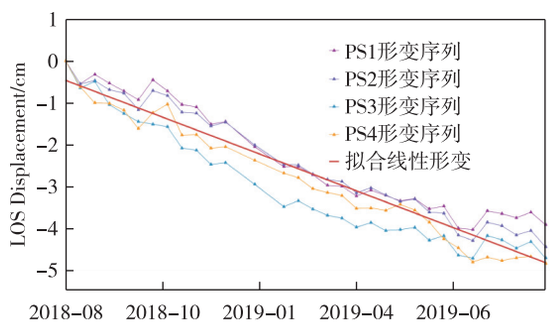
2)P2 区域

2018 年 12 月 27 日与 2019 年 2 月 7 日的 ALOS-2 差分干涉结果如图 5 所示,凯里市城区中央公园(P2)出现了与地形相关的大范围异常相位,但在后续的差分干涉结果中并未出现类似情况.该疑似隐患点周围有多栋居民楼,一旦发生形变,可能造成建筑物的破坏甚至坍塌.

P2 区域的时序处理结果如图 6 所示:该区域较稳定,年平均形变速率不足 1 cm,累计形变序列也并未表现出明显的趋势,D-InSAR 干涉结果不足以探测到这样微小的形变.对比分析两个方法的结果,推测差分干涉图中的异常是由于大气湍流导致的大气



a. P1区域平均形变速率



b. P1区域累积形变序列

图 4 P1 区域 SBAS 时序结果

Fig. 4 SBAS time series results for P1,(a) average deformation velocity,and (b) cumulative deformation time series

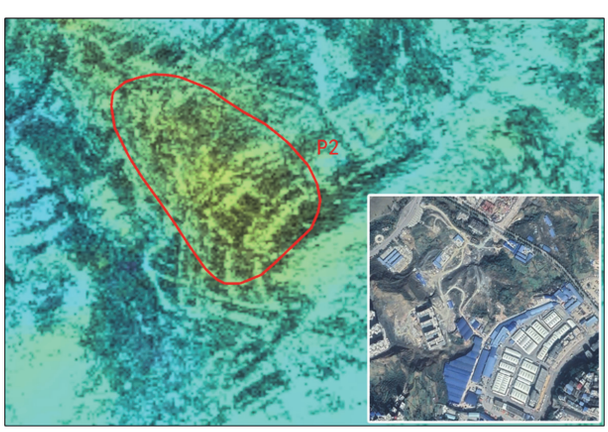
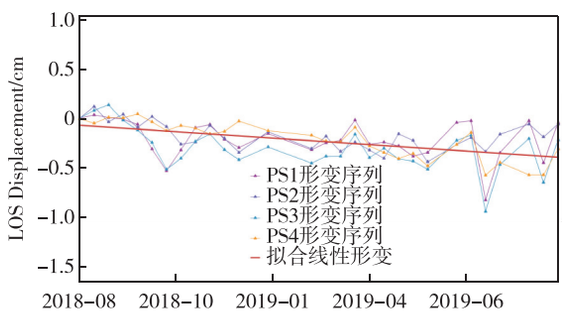


图 5 P2 区域 D-InSAR 监测结果

Fig. 5 D-InSAR result for area P2



a. P2区域平均形变速率



b. P2区域累积形变序列

图 6 P2 区域 SBAS 时序结果

Fig. 6 SBAS time series results for P2,(a) average deformation velocity,and (b) cumulative deformation time series

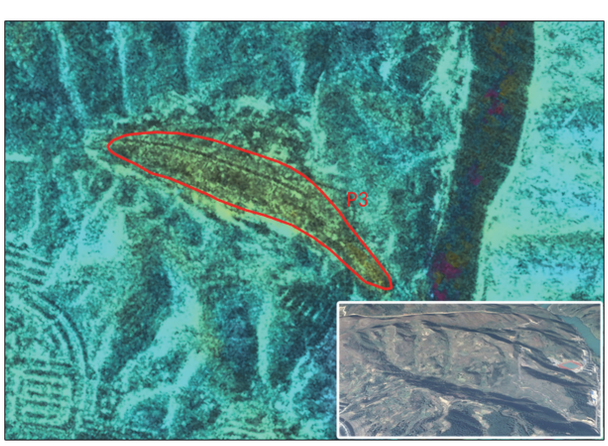


图 7 P3 区域 D-InSAR 监测结果

Fig. 7 D-InSAR result for area P3

延迟相位,因为大气相位在空间上相关而在时间上不相关,恰恰符合 D-InSAR 历史监测结果的特征.初步判定该区域并未发生形变,现场核查结果也证实了我们的结论.

3)P3 区域

剑河县革东镇沅江西岸(P3)在 2018 年 12 月 27 日与 2019 年 2 月 7 日的干涉图中出现了一处与 P2 区域差分干涉结果类似的区域,如图 7,该区域位于山谷,覆盖范围较大,且形态与地形相关.

经 SBAS 时序分析验证,P3 区域的异常相位并非误差影响,图 8 显示山谷区域向着远离卫星的方向发生了形变,且山谷上部形变速率大于下部形变速率的特点满足其上陡下缓的地形,最大形变速率

为 7 cm/a.

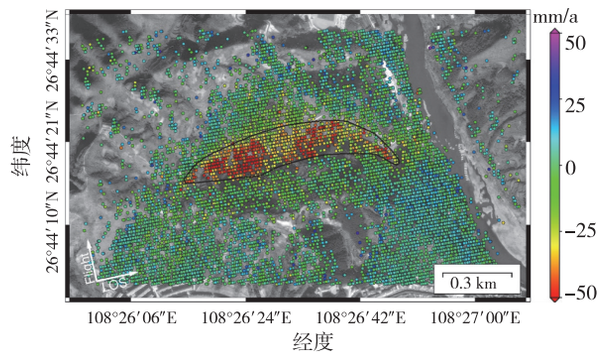


图 8　P3 区域 SBAS 时序结果

Fig. 8　SBAS time series results for P3

4)P4 区域

在 2018 年 12 月至 2019 年 9 月的多对 ALOS-2 差分干涉结果中,P3 区域西北方向约 1 km 处的一处山谷(P4)并未显示出明显的形变信号,图 9 展示了该区域 2019 年 2 月 7 日与 2019 年 3 月 21 日的差分干涉结果.

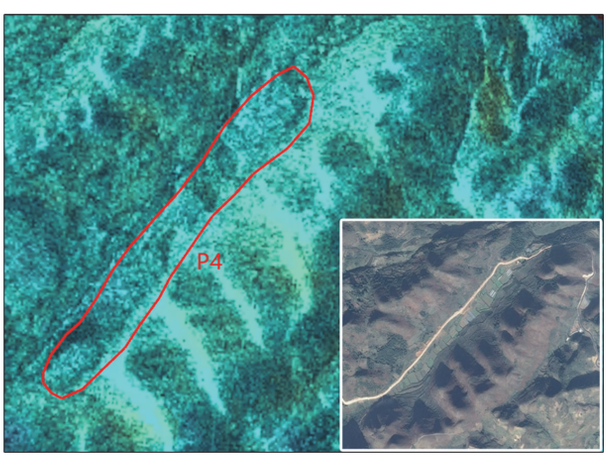


图 9　P4 区域 D-InSAR 监测结果

Fig. 9　D-InSAR result for area P4

在对 P3 区域进行 SBAS 时序处理的过程,我们发现 P4 区域发生了微小形变,其平均形变速率如图 10 所示,最大形变速率为 5 cm/a.

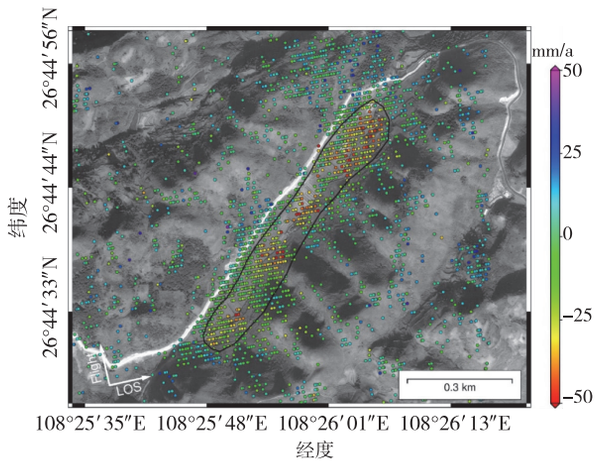


图 10　P4 区域 SBAS 时序结果

Fig. 10　SBAS time series results for P4

3.2　D-InSAR 和时序 InSAR 的应用能力

结合以上 4 个研究区域的 InSAR 监测结果,对 D-InSAR 和 SBAS 时序 InSAR 技术在地质灾害隐患探测中的优势、劣势、应用场景以及效果进行总结(表 2),可以看出差分干涉测量与小基线集时序 InSAR 技术的结合可以实现两种方法的优势互补,实现大规模、高精度、定量化的地质灾害早期识别.

4　总结

本文采用差分干涉测量和小基线集时序 InSAR 技术对贵州黔东南州进行了地质灾害隐患点排查,对两种方法的监测结果进行了对比分析,验证了两种方法的结合在地质灾害隐患普查中的可行性,并获取了隐患点雷达视线方向的累计形变序列和平均形变速率.通过对 4 个实验区域的形变探测结果的分析,可以得出以下结论:

1)D-InSAR 技术可以快速进行大范围的地表形变监测,但由于时空失相干、大气相位延迟、DEM 误差等因素的影响,其监测结果不能准确地提取地表形变信息;

表 2　D-InSAR 和 SBAS 时序 InSAR 的应用能力

Table 2　Applicability of D-InSAR and SBAS time series InSAR

方法	优势	劣势	应用场景	效果
差分干涉测量(D-InSAR)	处理效率高	受到各类误差的影响	短时间间隔,大范围地表监测	大范围定性分析
小基线集时序 InSAR(SBAS)	去除低相干点,消减大气扰动、DEM 误差等因素的影响	大范围处理效率低	长时期观测序列,小范围形变监测	重点区域定性/定量分析

2)SBAS 时序 InSAR 技术由于其对时空基线的限制,一定程度上保证了干涉对的相干性,弱化了时空失相干的影响,通过时间序列的分析可以削弱甚至去除大气及 DEM 误差的影响,但由于其处理要求较高,对于大范围的时序分析,需要耗费较多的时间计算;

3)D-InSAR 和 SBAS 时序 InSAR 技术结合可以较好地将二者的优势互补,D-InSAR 大大缩小了 SBAS 的处理范围,SBAS 进一步去除误差影响,准确地提取形变信号,并获取时间序列形变特征.

两种技术的结合为地质灾害隐患点的大范围、迅速、准确的排查提供了一种技术手段,提高了地灾早期探测和识别的效率.随着 SAR 传感器及其他新型监测技术的发展,"空-天-地一体化"的监测技术体系将会更好地服务于地质灾害防治工作.

参考文献

References

[1] Li M Z,Lv J,Chen X,et al.Provincial evaluation of vulnerability to geological disaster in China and its influencing factors: a three-stage DEA-based analysis [J]. Natural Hazards,2015,79(3):1649-1662

[2] 郭振春.贵州地质灾害的主要类型和诱因及其预防建议[J].贵州地质,2003,20(2):103-105,102
GUO Zhenchun. Major types of geological hazards and predisposition in Guizhou and its preventive suggestion [J].Guizhou Geology,2003,20(2):103-105,102

[3] 廖明生,张路,史绪国,等.滑坡变形雷达遥感监测方法与实践[M].北京:科学出版社,2017:40-42
LIAO Mingsheng,ZHANG Lu,SHI Xuguo,et al.Methods and practice of radar remote sensing monitoring of landslide deformation [M]. Beijing: Science Press, 2017: 40-42

[4] Atzori S,Hunstad I,Chini M,et al.Finite fault inversion of DInSAR coseismic displacement of the 2009 L'Aquila earthquake (central Italy) [J]. Geophysical Research Letters,2009,36(15):L15305

[5] Chang H C, Ge L L, Rizos C. DInSAR for mine subsidence monitoring using multi-source satellite SAR images[C]// Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,2005:1742-1745

[6] Hooper A,Bekaert D,Spaans K,et al.Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation[J].Tectonophysics,2012,514/515/516/517:1-13

[7] 李德仁,廖明生,王艳.永久散射体雷达干涉测量技术[J].武汉大学学报(信息科学版),2004,29(8):664-668
LI Deren,LIAO Mingsheng,WANG Yan.Progress of permanent scatterer interferometry [J]. Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004,29(8):664-668

[8] Ferretti A,Prati C,Rocca F.Permanent scatterers in SAR interferometry[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2001,39(1):8-20

[9] Berardino P,Fornaro G,Lanari R,et al.A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11):2375-2383

[10] 秦晓琼,杨梦诗,王寒梅,等.高分辨率 PS-InSAR 在轨道交通形变特征探测中的应用[J].测绘学报,2016,45(6):713-721
QIN Xiaoqiong, YANG Mengshi, WANG Hanmei, et al. Application of high-resolution PS-InSAR in deformation characteristics probe of urban rail transit[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2016,45(6):713-721

[11] Hu B,Wang H S,Sun Y L,et al.Long-term land subsidence monitoring of Beijing (China) using the small baseline subset (SBAS) technique [J]. Remote Sensing, 2014,6(5):3648-3661

[12] Ardizzone F,Angeli M G,Calò F,et al.Temporal and spatial analysis of landslides through the SBAS-DInSAR approach:the Ivancich,Assisi,test case[C]// Egu General Assembly Conference.Vienna,Austria,2012:4319

[13] Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry [J]. Nature, 1993, 364 (6433): 138-142

[14] 蒋弥,丁晓利,李志伟,等.用 L 波段和 C 波段 SAR 数据研究汶川地震的同震形变[J].大地测量与地球动力学,2009,29(1):21-26
JIANG Mi,DING Xiaoli,LI Zhiwei,et al.Study on coseismic deformation of Wenchuan earthquake by use of L and C wavebands of SAR data[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2009,29(1):21-26

[15] Hooper A,Zebker H,Segall P,et al.A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers[J].Geophysical Research Letters,2004,31(23):1-5

[16] Torres R,Snoeij P,Geudtner D,et al.GMES Sentinel-1 mission[J].Remote Sensing of Environment,2012,120:9-24

[17] Farr T G, Kobrick M. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data[J].Eos Transactions American Geophysical Union,2000,81(48):583-585

Detection of geological hazards danger points and deformation time series analysis based on satellite InSAR technique

LU Chaoran[1] CAI Jiehua[1] LIU Donglie[2] GUO Jincheng[2] DONG Jie[3] LIAO Mingsheng[1]

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying,Mapping and Remote Sensing,Wuhan University,Wuhan 430079

2 Guizhou Provincial First Institute of Surveying and Mapping,Guiyang 550025

3 School of Remote Sensing and Information Engineering,Wuhan University,Wuhan 430079

Abstract The frequent occurrence of geological disasters has brought irreversible great harm to natural environment and human society directly or indirectly.In recent years,China has been strengthening the efforts of early identification and effective prevention of geological disasters.Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) has been recognized as an important deformation detecting method with the advantages of all-time,all-weather,high accuracy,and large scale monitoring.In this paper,potential geological hazard points in Qiandongnan prefecture of Guizhou were detected by processing ALOS-2/PALSAR-2 and Sentinel-1 SAR data with D-InSAR and SBAS time series InSAR.The detection results of four representative research areas revealed that:D-InSAR has advantage in large-scale detecting while SBAS has superiority in high-precision monitoring.Hence,the two methods can complement each other and improve the reliability of identification for geological hazards.The cumulative deformation time series and average deformation velocity can be obtained by SBAS simultaneously,which provides valuable reference for geological disaster prevention in Guizhou.

Key words Qiandongnan prefecture of Guizhou;geological hazards;differential InSAR (D-InSAR);small baseline subsets (SBAS);deformation time series analysis