引文格式：余华芬, 吴迪, 汪建光, 等. 基于InSAR的地质灾害早期识别与监测技术研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(3): 44-48. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.03.010

基于InSAR的地质灾害早期识别与监测技术研究

余华芬[1]，吴　迪[1]，汪建光[1*]，周　伟[2]
（1. 浙江省测绘科学技术研究院，浙江 杭州 311100；2. 中国科学院 空天信息创新研究院，北京 100094）

摘　要：响应当前地质灾害防治迫切需要一种大范围、高精度、周期性监测管理手段的需求，开展星载InSAR技术在地质灾害早期识别和监测中的应用研究。对植被覆盖区域InSAR数据处理算法进行优化，通过形变时序信息分析地表异常形变趋势，为地质灾害早期识别与监测提供客观的定量数据，以提高地质灾害点管理效率，减少实地观察的人工和风险。相关经验对国内类似项目的开展具有重要参考意义。

关键词：地质灾害；InSAR；地表形变；早期识别；技术研究
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）03-0044-05

Research on Early Identification and Monitoring Technology of Geological Disaster Based on InSAR

YU Huafen[1], WU Di[1], WANG Jianguang[1], ZHOU Wei[2]
(1. Zhejiang Institute of Surveying and Mapping Science and Technology, Hangzhou 311100, China;
2. Aerospace Information Innovation Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: In response to the urgent need for a large-scale, high-precision and periodic monitoring and management means for the prevention and control of geological disasters, we carried out the application research of spaceborne InSAR technology in the early identification and monitoring of geological disasters, optimized the InSAR data processing algorithm in the vegetation coverage area, and analyzed the surface abnormal deformation trend through the deformation time series information, which could provide objective quantitative data for early identification and monitoring of geological disasters, improve the management efficiency of geological disaster points, and reduce the labor and risk of field observation. Relevant experience has important reference significance for the development of similar projects in China.

Key words: geological disaster, InSAR, surface deformation, early identification, technical research

“十三五”以来，随着“除险安居”三年行动等各类消除地质灾害点工作的深入推进，浙江省在地质灾害防治上取得了一系列成果[1]；但随着山区经济的快速发展，建设活动增多，在一定程度上增加了地质灾害产生的风险，因自然或人为因素导致地质灾害、造成大量损失的现象还是时有发生，且对已治理过的地质灾害点或有可能发展为地质灾害点的区域仍缺乏长期有效的监测和预测手段。常规精密水准、全站仪和GPS等测绘技术，由于基于点观测且自动化程度低，无法对浙江省全域形变场和时空演化模式进行一盘棋、系统把控，因此急需一种可获取历史地表变形数据，全面、客观定量评估地质灾害易发区域状态，应用于地质灾害排查与识别评价中，可提升地质灾害防控水平的新方法。

合成孔径雷达干涉技术（InSAR）是一种穿透能力强[2]，可获取地形高程数据和测量地表微形变，具有全天候全天时、高分辨率、广覆盖、高时间重返特征的观测手段，可有效弥补常规地面测量漏测和复测等问题[3]，已在诸多应用中得到展现。例如，Komac指出了永久散射体干涉合成孔径雷达技术的缺陷，采用星载InSAR结合GPS对现场滑坡灾害进行比较，评估了边坡运动监测方面的一致性；Intrieri等利用45幅Sentinel-1星载SAR影像分析得出茂县滑坡边坡破坏的前兆，检测到卫星视线范围内的最大位移速率为27 cm/a；王腾利用40景星载InSAR影像对巴东新城区进行变形监测发现，时间序列星载InSAR技术能有效

收稿日期：2021-11-05；修回日期：2021-12-20。
项目来源：浙江省自然资源厅科技资助项目（2020-46）。
第一作者简介：余华芬（1981—），正高职高级工程师，主要研究方向为摄影测量与遥感技术应用，E-mail：zjchwjg@qq.com。
通信作者：汪建光（1963—），正高职高级工程师，现从事摄影测量与遥感、地理国情监测、自然资源监测等工作，E-mail：1024307794@qq.com。

监测该区域的两个滑坡；史绪国等对三峡库区树坪滑坡进行变形监测发现，周期性的库水位变化会对滑坡变形产生影响，水位下降时对滑坡的稳定性危害最大；张毅利用时间序列星载InSAR技术对白龙江流域进行了滑坡早期识别研究，成功识别活动斜坡133处。目前国外应用InSAR技术已基本成熟，英国已建立了基于光学、雷达遥感影像的管道地质灾害风险评价模型；而国内将InSAR技术应用于地质灾害早期识别方面还处于起步阶段，用于全省范围内的地质灾害早期预警，尚无案例。

InSAR提供的地表移动变形数据，可从区域上解决大范围快速调查和排查的问题，有助于地质灾害的早期识别。围绕灾害形变的应用可分为3个层次：①变形识别，发现变形坡体，明确活动幅度，辅助实地判别；②变形表征，表征变形体的范围、边界和强度，即变形特征的全面表征；③连续监测，监测蠕变、加速、快速各阶段形变特征，实现对形变过程的监测。

1　研究方向与数据基础

InSAR利用合成孔径雷达（SAR）数据提取的相位信息来获取地表三维信息和变化信息。首先通过两副天线同时观测（单轨模式）或两次近平行的观测（重复轨道模式）获取地面同一景观的主、辅SAR影像对，并经共轭相乘相干处理得到干涉纹图；然后根据天线和观测目标之间的几何关系，结合观测平台轨道参数和传感器参数，获取高精度、高分辨率的地面三维信息和形变信息。传统差分雷达干涉侧重于单次形变或两个时刻的累积形变，由于时间、空间去相干和大气扰动的影响，较难获得高精度的时间序列形变信息。长时序雷达干涉技术能有效克服上述局限性，基于观测时间段内获取的SAR影像集，将影像集中的影像按照一定的组合模式进行配对，形成干涉图，再对干涉相位进行信号分离和提取，从而获得地表形变信息。

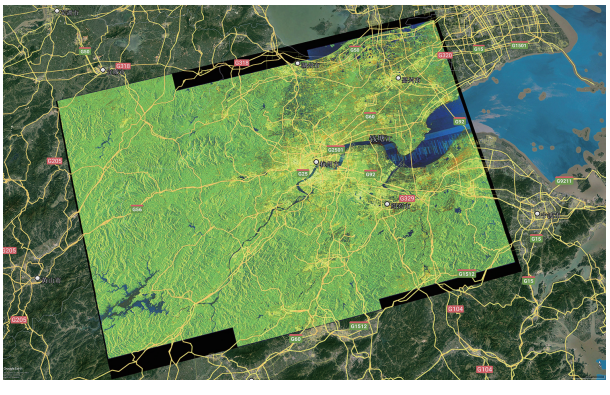


图1　Sentinel-1数据覆盖范围

本文选取的研究区为浙江省北部，Sentinel-1中分辨率雷达卫星影像的覆盖范围如图1所示；收集的主要数据为IW干涉宽幅模式20 m分辨率的时序雷达数据，时相为2019年1月—2020年12月，共58景；参考数据为0.2 m高清航空影像、坡度数据、基础测绘数据等。

2　关键技术研究

2.1　基于InSAR的Sentinel-1 TOPS数据电离层校正方法

Sentinel-1虽为C波段SAR系统，但因其TOPS模式独特的成像几何，数据易受大气中电离层变化的影响。主流Split Spectrum技术可不依赖于外部数据源，以较高的精度实现干涉数据的电离层直接相位影像校正，但不能解决Sentinel-1 TOP模式干涉数据中仍存在的影像配准误差造成的相位跳变，因此本文融合Split Spectrum和ESD算法，首先利用Split Spectrum模拟电离层总电子含量变化产生的直接相位误差，再利用ESD来校正TOPS数据子带间的相位跳变。具体方法为：①对精配准后的重轨单视复数数据进行距离向带通滤波，基于Split Spectrum技术模拟电离层直接相位影响；②利用ESD计算由电离层造成的距离向配准误差，以消除干涉数据中由电离层造成的间接方位向相位跳变。频谱分裂法可表示为：

$$\Delta\varphi_{\text{iono}}=\frac{f_{\text{L}}f_{\text{H}}}{f_0\left(f_{\text{H}}^2-f_{\text{L}}^2\right)}\left(\Delta\phi_{\text{L}}f_{\text{H}}-\Delta\phi_{\text{H}}f_{\text{L}}\right)$$

$$\Delta\varphi_{\text{non-disp}}=\frac{f_{\text{L}}f_{\text{H}}}{f_{\text{H}}^2-f_{\text{L}}^2}\left(\Delta\phi_{\text{H}}f_{\text{H}}-\Delta\phi_{\text{L}}f_{\text{L}}\right)$$

式中，$\Delta\varphi_{\text{iono}}$为模拟的电离层直接相位；$\Delta\varphi_{\text{non-disp}}$为去除电离层后的相位；$f_0$为数据原始频率；$f_{\text{L}}$、$f_{\text{H}}$分别为进行带通滤波后的高、低分量频率；$\Delta\phi_{\text{L}}$、$\Delta\phi_{\text{H}}$为对应的干涉相位。

频谱差异法（SD）可表示为：

$$\Delta t=\frac{\varphi_{\text{azerr}}(t)}{2\pi\Delta f_{\text{DC}}(t)}$$

式中，φ_{azerr}为估算的相位偏移量；Δf_{DC}为相邻两个干涉对在同一空间位置处的多普勒中心频率差异；Δt为估算的配准偏移量。

增强频谱差异法是在SD法的基础上，根据Burst模式成像的特点，将相邻的一组相邻子带重叠区代替方位向上的带通滤波。Sentinel-1 TOPS模式相邻子带重叠区多普勒频率不同，由此重轨数据重叠区对应子带分别生成的干涉图的Δf_{DC}更大，从而对于误差的变

化更加敏感，基于此可计算得到由电离层带来的间接配准误差，消除干涉图中子带间的相位跳变。

2.2 小基线集（SBAS）时序雷达干涉方法

SBAS方法提出的初衷是提取低分辨率、大尺度的地表形变。该方法SAR影像序列按照短空间基线距组合原则，生成若干短基线干涉数据集，使集合内的干涉对空间基线距小、集合之间的干涉对空间基线距大[4]。对于每个小集合，可采用最小二乘法反演形变参数，但单个集合内时间采样不够，为提高数据处理的时间采样率，需连接多个SBAS，引入奇异值分解，获取最小范数意义上的最小二乘解[5]。

2.3 山地区与形变相位优化方法

浙江省拥有“七山一水两分田”，丘陵山地占比较高，地质灾害发生区域又都位于山地区[6]，对数据处理提出了挑战。利用SBAS方法估算未知参数（如运动和残余高度），再去除地形相位和平地相位获得差分干涉图，最后估计缠绕相位的整数模糊度，即相位解缠[7]，是推导地表形变估计最关键的步骤。由低密度点组合引起的去相关、在2π上的相位不连续性、大的地形和高位移率是造成解缠误差的主要原因。三维解缠算法（包括在时间和空间域中）对大量的小基线干涉图测试性能良好，得到了较好应用，需要假设一个稳定的参考点（远离滑坡）将差分相位转换为绝对值。

经过上述处理，形变相位仍与轨道误差、大气误差和残余地形误差混在一起[8]。在地形起伏较大的区域，这种误差可能会被放大几倍。大气路径延迟可分为由湍流混合过程引起的分层分量和由高程引起的分层分量两部分，后者通常被误解为地形或形变。首先利用SBAS方法去除与垂直基线相关的地形误差；然后利用一个组合模型，包括轨道相位误差的双二次模型以及高程相关误差（分层大气延迟和地形误差）的线性模型，进一步减少轨道、残余地形和大气干扰产生的误差（图2）。

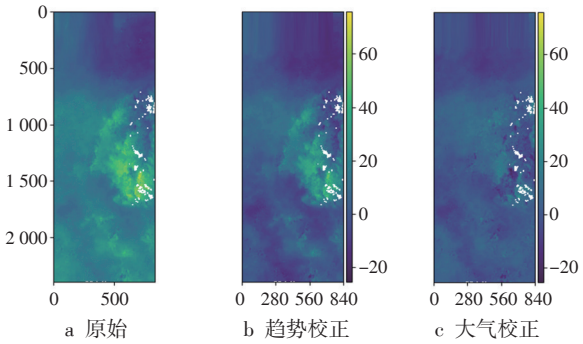


图2 形变相位优化后对比效果图

组合模型可表达为：

$$\varphi(x,y)=\alpha_0+\alpha_1x+\alpha_2y+\alpha_3xy+\alpha_4x^2+\alpha_5y^2+\alpha_6h(x,y)+\varepsilon(x,y)$$

式中，x 和 y 分别为距离和方位坐标；h 为高程；ε 为随机相位误差；α_i 为待估计系数。

正确解缠并消除相位误差后，再进行时间和空间滤波，最后利用最小二乘法推导形变速率和时间序列位移[9]。

3 数据处理方法

1）Sentinel-1中分辨率雷达数据的获取与预处理。具体步骤包括长时间序列SLC影像高精度配准（子像素级）、强度影像辐射校正等。

2）基于改进的SBAS方法反演形变场。在干涉图生成阶段，采用自主研发的干涉图提升技术（包括重轨SAR影像配准、电离层校正和对流层校正3个部分[4]）提升SBAS形变反演方法对于该雷达数据在山区地理环境中的适用性。经过上述处理，Sentinel数据的干涉数据得到校正，能以更高的精度应用于时序雷达干涉测量微形变参数解算中。后续处理仍采用自主研发的长时序雷达干涉形变监测软件进行形变场反演[10]。

3）滑坡潜在风险靶区提取。基于获取的形变场信息提取重点异常地表形变区域，经实地验证，并结合浙江省的地质地貌特性，将形变速率大于10 mm/a的区域定为高风险区。另外，经分析发现平地区域的地表沉降多与地下水开采、滨水区域填土、新建区域地表承压、垃圾填埋等因素相关，与滑坡等地质灾害无直接关联。因此，首先利用坡度信息剔除坡度小于15°的平地区域内的相干点，再利用浙江省垃圾填埋的专题矢量图层去除垃圾填埋区域的相干点，最后得到滑坡潜在风险区域的形变场信息。

4）重点监测靶区异常形变驱动力分析。通过叠加同观测周期内的光学影像，并结合气象、主要人类活动等辅助信息，综合分析异常形变趋势与地学因子的时空相关性，进而剖析地表形变灾害的主导因素。具体技术路线如图3所示。

4 研究结果与分析

本文反演得到的研究区2019—2020年地表年平均形变速率图如图4所示，可以看出，研究区总体地表平稳，主要形变位于山坡坡体植被覆盖受扰动的区域。

4.1 实地验证情况

2021年5月—6月进行了典型区域的野外考察验

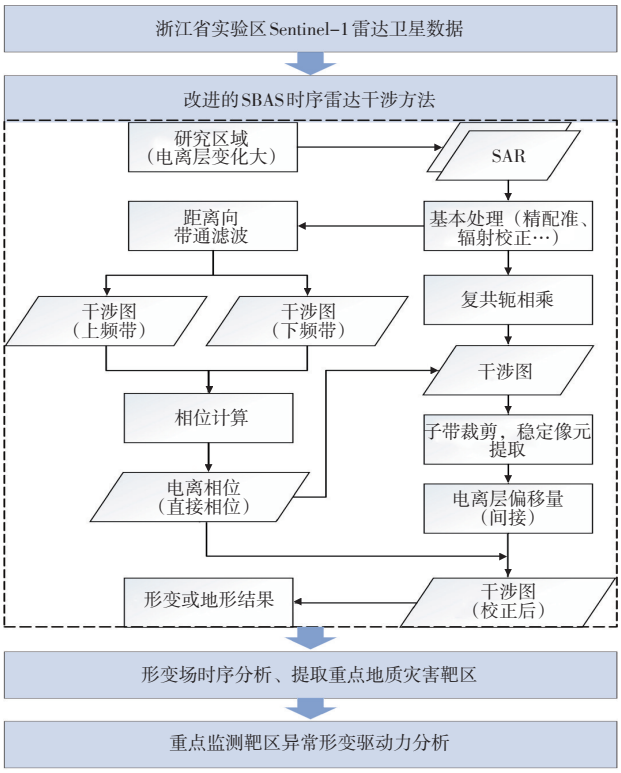


图3　技术路线图

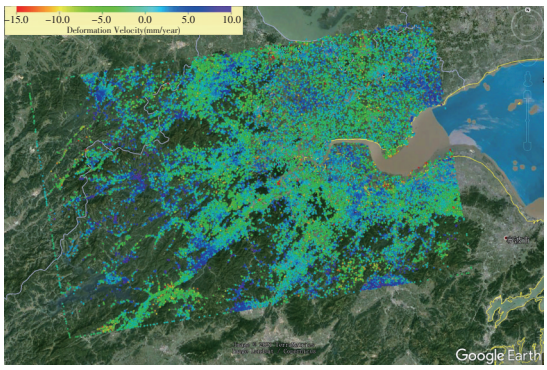
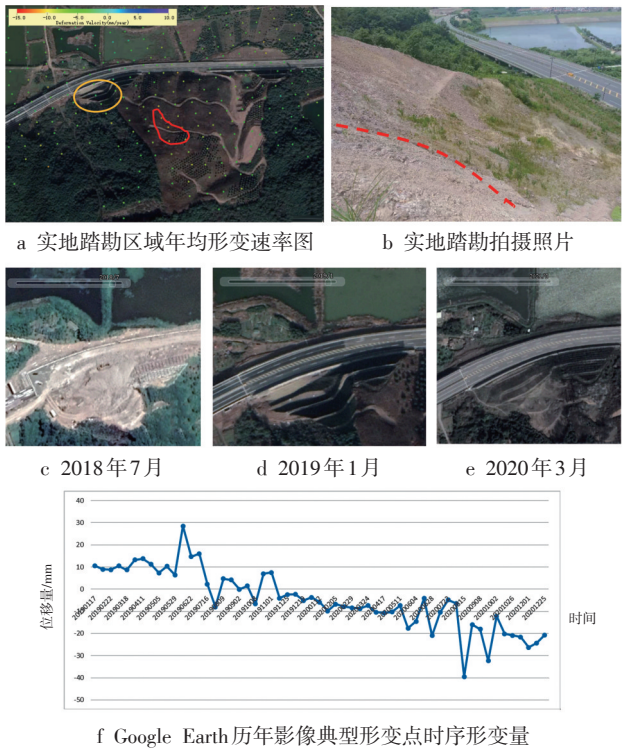


图4　浙江大范围地表年平均形变速率图（2019—2020年）

证，对典型区域沉降情况和成因进行了分析。

1）人类活动典型区域。图5a中提取的形变趋势较大区域，经现场验证为修路人工削切山坡破坏了坡体植被，影响了坡体稳定性。现场踏勘发现，该坡体中间有一道约长5 m、宽10 cm的裂缝，存在较大的滑塌风险。通过对比Google Earth中的历年影像（图5b）可知，该区域2018年正在修建公路，2019年是修好的状态，2020年已出现过一次滑塌，目前仍有再次滑塌的风险。通过分析该区域典型形变相干点的形变时序信息（图5f）发现，该区域的形变速率在2020年6月之后呈显著增大趋势，与现场踏勘情况一致。

2）垃圾填埋场典型区域。经实地踏勘，该区域为垃圾填埋场（图6），因新填埋的垃圾渗透液流出和气体排放，会出现地表形变信号。该类信息为形变干扰信息，可通过叠加全省垃圾填埋场分布图，将滤除

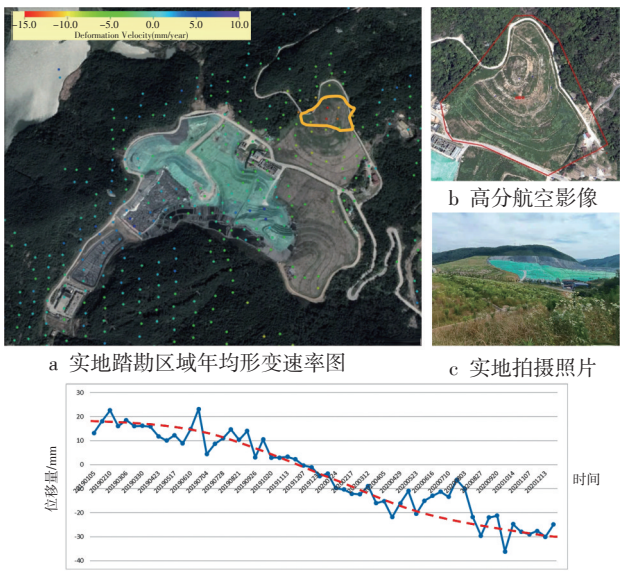


a 实地踏勘区域年均形变速率图　b 实地踏勘拍摄照片

c 2018年7月　d 2019年1月　e 2020年3月

f Google Earth历年影像典型形变点时序形变量

图5　人类活动典型区域实地验证



a 实地踏勘区域年均形变速率图　b 高分航空影像　c 实地拍摄照片

d 典型形变点时序形变信息

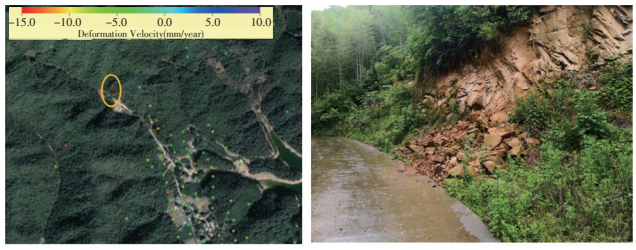
图6　垃圾填埋场典型区域实地验证

该类形变信息。

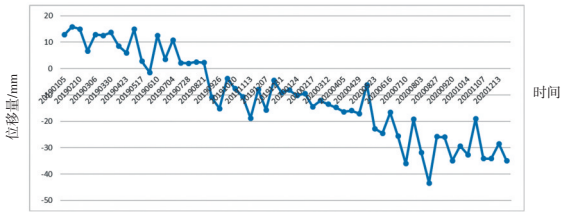
3）频发型典型区域（图7）。因坡体植被破坏导致的坡体结构失稳，在降雨量较大时引发山体滑坡，且经实地调研，这两处均为二次或多次滑坡所在区域，属于地质灾害频发区。由图7c可知，该区域的形变存在加剧现象，未来再次发生滑坡的风险依然较大。

4.2　检出率分析

本文搜集了2019—2020年实际发生地质灾害的调研数据，并进行对比验证。考虑到中分辨率SAR数据



a 实地踏勘区域年均形变速率图　　b 实地踏勘拍摄



c 典型形变点时序形变信息

图7 频发型典型区域实地验证

定位精度约为百米，对实际发生地质灾害的点位周边进行500 m的缓冲区分析，若缓冲区内提取出滑坡潜在风险靶区，即为检出。据此生成地质灾害检出率图，并统计得到检出率为45.9%（图8）。由于实地调研区域多为居住区或道路等交通设施附近，即已有灾害造成显著经济损失的区域，实际发现灾害的区域还包括远离居民区的一些偏远区域，这些因素都会降低检出率。

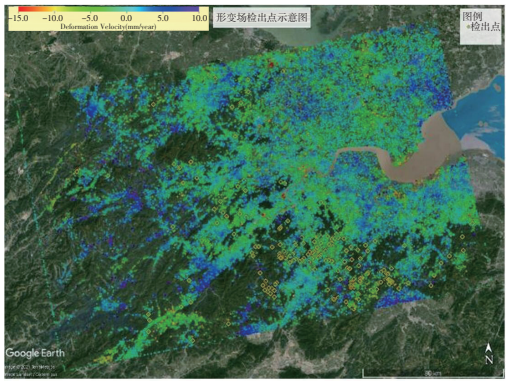


图8 滑坡等地质灾害点检出点示意图

4.3 驱动因素分析

综上所述，通过实地踏勘证实了提取的地表微变区域确实存在地表形变，验证了形变场反演结果的准确性。形变的主要驱动因素可归纳为3类：

1）坡体被开凿修路、采矿、建工厂等建设施工因素，导致坡体表面覆盖植被被严重破坏，在降雨量显著增加时，易发生泥石流、滑坡等地质灾害，这是浙江地区最常见的地质灾害驱动因素。

2）在地表进行人工种植或施工建设等，对土壤的耕种扰动、新建工地土壤承压等导致出现地表微变信号。

3）垃圾填埋场等特殊地区，因新填埋的垃圾渗透液流出和气体排放，会出现地表形变信号。该信息为形变干扰信息，建议可通过叠加全省垃圾填埋场分布图来滤除该类形变信息。

5 结 语

本文通过理论分析、算法研究、现场验证，形成了区域地质灾害开展早期识别和排查筛选的完整技术路线，得到了算法、软件、手册等研究成果，为省级地质灾害安全风险防控提供了技术支撑，具有重要意义。目前，InSAR数据在植被覆盖较密集的区域无法获取干涉信息，导致地质灾害点检出率无法继续提高是该项技术的瓶颈，为提高检出率，后续可考虑采用机载InSAR开展更加深入的研究。

参考文献

[1] 周飞飞. 全国地面沉降恶化趋势将在十年内得到有效控制:陶庆法解读《全国地面沉降防治规划(2011-2020年)》[J]. 国土资源导刊,2012,9(10):29-31

[2] 张拴宏,纪占胜. 合成孔径雷达干涉测量(InSAR)在地面形变监测中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,2004,15(1):112-117

[3] 马超,单新建. 星载合成孔径雷达差分干涉测量(D-InSAR)技术在形变监测中的应用概述[J]. 中国地震,2004,20(4):410-418

[4] 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):2 375-2 383

[5] 陈富龙,林珲,程世来. 星载雷达干涉测量及时间序列分析的原理、方法与应用[M]. 北京:科学出版社,2013

[6] 李政龙,吴精通. 浙江省泥石流的成因及预测[C]//浙江省地质学会. 纪念地质学家朱庭祜先生诞辰120周年:浙江省地质学会2015年学术年会论文集,2015:12

[7] 许才军,王华. InSAR相位解缠算法比较及误差分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2004,29(1):67-71

[8] 王志勇. 星载雷达干涉测量技术在地面沉降监测中的应用[D]. 青岛:山东科技大学,2007

[9] TANG P, CHEN F, GUO H, et al. Large-area Landslides Monitoring Using Advanced Multi-temporal InSAR Technique over the Giant Panda Habitat, Sichuan, China[J]. Remote Sensing,2015,7(7):8 925-8 949

[10] Cigna F, Ventisette C D, Liguori V, et al. InSAR Time-series Analysis for Management and Mitigation of Geological Risk in Urban Area[C]. IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, IGARSS 2010, Honolulu, Hawaii, USA