

中国科技核心期刊 《中国科学引用文数据库》来源期刊 Caj-cd规范获奖期刊

THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL

基于轨道精炼控制点精选的极艰险区域时序InSAR地表形变监测

潘建平,邓福江,徐正宣,向洪文,涂文丽,付占宝

Time series InSAR surface deformation monitoring in extremely difficult area based on track refining control points selection

PAN Jianping, DENG Fujiang, XU Zhengxuan, XIANG Qiwen, TU Wenli, and FU Zhanbao

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-12

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

国产GB-InSAR在特大型水库滑坡变形监测中的应用

Application of GB-InSAR in deformation monitoring of huge landslide in reservoir area 郭延辉,杨溢,杨志全,高才坤,田卫明,何玉童 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 66-72

CORS网和GNSS技术在地面变形监测中的应用

Application of CORS network and GNSS technology in ground deformation monitoring: Taking southeast Zhejiang Province as an example 王伟, 党亚民, 章传银, 杨强 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 73–77

基于高分影像与InSAR解译的西藏林芝则隆弄高位链式地质灾害发育特征分析

Analysis of development characteristics of high-elevationchain geological hazard in Zelongnong, Nyingchi, Tibet based on high resolution image and InSAR interpretation

李军, 褚宏亮, 李滨, 高杨, 王猛, 赵超英, 刘晓杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 42-50

面向东川复杂山地泥石流沟谷三维地形建模及特征分析的无人机遥感探测应用研究

Application research of unmanned aerial vehicle remote sensing detection for 3D terrain modeling and feature analysis of debris flow gullies in complex mountainous area of Dongchuan 毕瑞, 甘淑, 李绕波, 胡琳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 91–100

基于理想点--可拓云模型的隧道围岩稳定性评价

Stability evaluation of tunnel surrounding rock based on ideal point-extension cloud model 何乐平, 罗舒月, 胡启军, 蔡其杰, 李浴辉 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 126-134

西藏然乌湖口高位地质灾害变形特征分析

Analysis on deformation characteristics of geological hazards in Ranwu Lake Estuary 赵志男, 李滨, 高杨, 赵超英, 刘晓杰, 王猛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 25-32



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-12

基于轨道精炼控制点精选的极艰险区域时序 InSAR 地表形变监测

潘建平¹,邓福江¹,徐正宣²,向淇文¹,徐文丽¹,付占宝¹ (1. 重庆交通大学土木工程学院,重庆 400074; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司 地勘院,四川成都 610031)

摘要:极艰险区域具有地形起伏极大、地理环境复杂和永久散射体稀少的特点,为此文章设计了一种改进的 SBAS-InSAR 技术进行地表形变监测。文章先从相干性、振幅离差指数、形变速率三个方面获得候选的永久性散射体点,之后辅以光 学影像精选出最终的永久性散射体点,将其作为轨道精炼控制点引入 SBAS-InSAR 解算过程,最终完成了研究区的地表 形变监测。通过对比分析常规的 PS-InSAR 技术与 SBAS-InSAR 技术,该技术在极艰险区域具有良好的应用价值。
关键词:轨道精炼控制点; SBAS-InSAR; 极艰险区域; 地表形变监测
中图分类号: P694 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2021)05-0098-07

Time series InSAR surface deformation monitoring in extremely difficult area based on track refining control points selection

PAN Jianping¹, DENG Fujiang¹, XU Zhengxuan², XIANG Qiwen¹, TU Wenli¹, FU Zhanbao¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Geological Exploration Institute of China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The extremely difficult area has the characteristics of extremely rugged terrain, complex geographical environment and sparse permanent scatterers. Therefore, an improved SBAS-InSAR technology is designed to monitor the surface deformation. In this paper, the candidate permanent scatterers are obtained from the coherence, amplitude dispersion index and deformation rate, and then the final permanent scatterers are selected by optical images, which are introduced into the SBAS-InSAR calculation process as orbit refining control points, and finally the surface deformation monitoring in the study area is completed. By comparing and analyzing the conventional PS-InSAR technology and SBAS-InSAR technology, the technology has good application value in extremely difficult areas.

Keywords: orbit refining control point; SBAS-InSAR; extremely difficult area; surface deformation monitoring

0 引言

合成孔径雷达干涉测量(Interferometry Synthetic Aperture Radar, InSAR)作为近年来新发展起来的一种地表监测技术,具有全天时、全天候、监测精度高、监测范围广等优点^[1],由其发展而来的合成孔径雷达差分

干涉测量(Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar, D-InSAR)通过对同一研究区的两景 SAR 影像进行差分干涉,获取精度为厘米级甚至毫米级的地表形变信息,极大得提升了 InSAR 技术在地表形变监测领域的应用前景^[2]。而以 D-InSAR 为基础发展起来的时序 InSAR 技术又解决了长期监测中时间失相干、空间失

收稿日期: 2020-09-18;修订日期: 2020-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41801394); 贵州省地矿局 2019 年局管科研项目 (黔地矿科合 201909); 重庆市规划和自然资源局科 技项目 (KJ-2020010)

第一作者:潘建平(1976-),男,安徽合肥人,博士,教授,主要从事摄影测量与遥感、地质工程方面的研究。E-mail: 6370554@qq.com

相干、大气延迟相位等因素的影响,成为了一种有效探测长时间缓慢地表形变的监测技术^[3-5]。

常见的时序 InSAR 处理技术有永久散射体合成孔 径雷达干涉测量(Persistent Scatters InSAR, PS-InSAR)技 术^[6]和小基线集合成孔径雷达干涉测量(Small Baseline Subset InSAR, SBAS-InSAR)技术^[7]。PS-InSAR 技术利 用时间序列影像中的永久性散射体(Persistent Scatters, PS)点来进行时序分析,可以有效地减少时间失相干、 空间失相干以及大气延迟相位对地表形变监测结果的 影响。2017年白泽朝等^[8]利用 PS-InSAR 技术成功获取 了天津市 2015 年至 2016 年地面沉降速率。SBAS-InSAR 技术通过设置时空基线阈值,从而利用短时间内 时序影像的空间相干性,有效减小了时间失相干、空间 失相干以及大气延迟相位对地表形变监测结果的影响, 同时还增加了时间采样率[9-10]。2019年刘晓杰等[11]利 用 SBAS-InSAR 技术和 Sentinel-1A 数据得到了厦门 新机场海洋填海区地面沉降特征。潘光永等[12]利用 SBAS-InSAR 技术对济南井田矿区进行了地面沉降监 测。PS-InSAR 技术和 SBAS-InSAR 技术各有优点,因 此两种技术在不同研究区域下的结合与交叉应用是当 前的研究热点。2019年王舜瑶等[13]利用一种顾及永久 性散射体的 SBAS-InSAR 方法获取了郑州市区的地表 形变信息,发现形变结果与水准测量吻合较好,说明了 该方法的可靠性。

文章以折多山区域为研究对象。极艰险区域永久 性散射体分布稀疏, PS-InSAR 技术无法获得较好的地 表形变结果,同时该区域高差极大,地形复杂,不利于 SBAS-InSAR 技术选取稳定的地面控制点(GCP),从而 降低了地表形变监测的精度。为此,采用了一种改进 的 SBAS-InSAR 技术,通过筛选合适的 PS 点作为 GCP 点引入到 SBAS-InSAR 技术处理流程,从而有效提高该 区域地表形变监测精度。

1 技术方法

文章采用 SBAS-InSAR 技术处理流程为主体,引入 顾及研究区实际概况的 GCP 点筛选研究,提高 SBAS-InSAR 技术地表形变监测精度,技术流程如图 1 所示。改进的 SBAS-InSAR 技术原理重点涉及 GCP 点筛选和 SBAS-InSAR 技术原理两个部分。

1.1 GCP 点筛选

GCP 点被引入 SBAS-InSAR 轨道精炼步骤来进行 残余相位估计和重去平处理,从而提高地表形变结果的 精度。GCP 点应当处于地形平缓,没有相位跃变且远





离形变区域的位置,根据 GCP 点选取特点,可以采用由 PS-InSAR 技术处理后提取的 PS 点作为 GCP 候选点。

PS 点是长时间序列影像中具有较高后向散射特性 以及稳定性的点,其在不同时期的影像干涉对中均表现 出高一致性与高相干性。振幅离差指数法^[14]、相干系 数阈值法^[15]均是常见的 PS 点选取方法。

(1)振幅离差指数法

PS 点较高的后向散射特性和稳定性体现在其回波的相位信息的长时间序列上具有一定的统计特性。根据这一特性,可以用振幅离差指数D₄来定量表示,具体表达示如下:

$$D_{\rm A} = \frac{\sigma_{\rm A}}{\mu_{\rm A}} \tag{1}$$

式中: D_A——振幅离差指数;

 σ_A ——振幅标准差;

μ_A——振幅均值。

当某像素点的振幅离差指数D_A的大小在 0.25~0.4 时,该点可以被视为 PS 点,但为了保证 PS 点的质量和 最终形变监测结果的可靠性,至少需要 25 幅 SAR 影像 参与计算。

(2)相干系数阈值法

相干系数是衡量干涉影像像对的干涉质量的重要 指标,它主要用于描述干涉对中主、副影像同一区域的 相似程度。相干系数数值分布区间为[0,1],0表示完全 不相干,1表示完全一致。根据 PS 点的特性,在相干性

· 99 ·

好的区域对应的相干系数也相对较高^[16],因此可以采用 相干系数为 PS 点选取的判断阈值,其表达式为:

$$\gamma = \frac{\left|\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} M(i, j) \cdot S^{*}(i, j)\right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} |M(i, j)|^{2} \cdot \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} |S(i, j)|^{2}}} \quad (2)$$

式中:m、n——主、辅影像内需要计算相干性的数据 块大小;

M(*i*, *j*)、*S*(*i*, *j*)——主、辅影像数据在(*i*, *j*)位置处的复数值;

*——复数的共轭算子;

|~|²——数据的二阶范数。

通过以任一像元为中心的*i*×*j*窗口大小进行计算, 即可得到该像元的相关系数值γ。γ值越高,像元越稳 定,受噪声影响较小,干涉相位的质量越高,高于设定的 相干系数阈值的像元点,即可判定为 PS 点。

实际处理中,联合多种 PS 点选取方法,通过多层阈 值过滤的方式,减少各 PS 点选取方法考虑特性单一带 来的影响,能够有助于提高 PS 点判断的准确性。选取 出的 PS 点作为 GCP 候选点引入后续得处理中。

高山区域地形起伏较大,部分裸露岩石位于非平坦 区域,此类因雷达散射特性稳定的永久性散射体,依然 有被提取并作为 GCP 候选点的可能。然而此类 GCP 候选点不符合 GCP 点的要求,若作为 GCP 点参与后续 流程解算,会降低形变结果精度。因此可以根据光学影 像来去除此类 GCP 候选点,最终得到 GCP 点并引入 SBAS-InSAR 技术处理流程。

1.2 SBAS-InSAR 技术原理

覆盖研究区的所有时间序列的 SAR 影像,假设有 *N*+1 幅 SAR 影像,其时间序列为:

$$t = |t_0, t_1, \cdots, t_N|^2$$
 (3)

通过选取其中一幅 SAR 影像作为超级主影像,将 其他 N 幅 SAR 影像都配准到该超级主影像的雷达坐标 系上来,像按照一定的时间、空间基线阈值来组合 SAR 影像,得到 M 幅干涉对,并对其进行差分干涉处理。假 设第 *i* 景差分干涉图由*t*₁,*t*₂(*t*₁ < *t*₂)时刻的两景 SAR 影像 复共轭相乘得到,则图上任一像元(*x*,*r*)的干涉相位为:

$$\Delta \varphi_i = \varphi_2 - \varphi_1 \approx \frac{4\pi}{\lambda} (d_{i_2} - d_{i_1}) + \Delta \varphi_{top}^i + \Delta \varphi_{APS}^i + \Delta \varphi_{noise}^i \quad (4)$$

式中: $i \in [1, 2, \cdots, M]$;

 d_t ——t时刻相对于 t_0 时刻的雷达视线向累积形变量;

$$\Delta \varphi_{i_{op}}^{i}, \Delta \varphi_{APS}^{i}, \Delta \varphi_{noise}^{i}$$
 ——差分十涉图中的残余地形
相位、大气延迟及轨道误差
相位和噪声相位。

去除Δφⁱ_{top}、Δφⁱ_{APS}、Δφⁱ_{noise}后,将某时间段的相位差值 与时间差值相除,即可得到对应时间段内地表形变平均 沉降速率V。假设时间段内地表形变为线性变化,可对 形变平均沉降速率做时间积分,推出差分干涉图的干涉 相位值,则各干涉相位与干涉序列关系表达为:

$$\Delta \varphi = AV \tag{5}$$

式中AV为[M×N]的矩阵,每一行对应每个干涉 对。当干涉对属于同一子基线集时,有r(A)=N,由最 小二乘法可得:

$$\varphi = (A^{T}A)^{-1}A^{T}\delta\varphi \tag{6}$$

式中δφ为解缠后干涉相位。然而,受时空基线的限制并非任意干涉对同属于某一小基线集,A为秩亏阵,导致最小二乘法的解不唯一。因此,采用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)来求解A的广义逆矩阵,因而可得到最小二乘范数解:

$$\hat{\varphi} = V \begin{bmatrix} \Sigma^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U^{T} \delta \varphi \tag{7}$$

式(7)中U为[$M \times N$]的正交矩阵且∑的对角元素为 奇异值 σ_i ($i = 1, \dots, N$),将求相位解转换为求相位变换 速率,则可得:

$$Bv = \delta \varphi \tag{8}$$

式(8)中B为[M×N]的矩阵,对B进行奇异值分解,可以解出各时间段内相位变化速率v,最后计算得到最终平均形变速率以及形变速率时间序列。

2 实验过程

2.1 研究区概况

研究区位于四川省甘孜自治州康定市西面的折多 山区域,面积约为1000 km²。研究区域地形高差大,沟 壑密布,山岭纵横,活动断裂带构造大量发育,属于极艰 险区域。研究区地理位置如图2所示。该区域复杂的 地理环境,使得常规工程测量施测难以开展,InSAR技 术所具备的全天时、全天候、大范围、高精度监测的优 势能在该区域得到较好的体现。

2.2 数据源

本文采用由欧空局提供的 Sentinel-1A 雷达卫星影像升轨数据,成像模式为干涉宽视场(IW)模式,极化方式为 VV 同极化,重访周期为 12 天,时间跨度为 2017



Fig. 2 Geographical location of the study area

年1月至2019年7月,共计76景。卫星精密轨道数据 采用欧空局提供的POD Precise Obrit Ephemerides (POD 精密定轨星历数据),共计76个。DEM 数据采用 美国航空航天局(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA) 联合测量的 SRTM1,分辨率为30m。

2.3 数据处理

实验数据处理采用了 SARscape 软件,按照改进后的 SBAS-InSAR 处理流程,得到研究区时间序列形变结 果和地表平均形变速率,并采用 GMT 软件绘制成年均 地表形变速率图。

(1)数据预处理。为减少计算冗余和处理时间,需 要按研究区范围进行预先的裁剪。

(2)连接图生成。对预处理后的研究区影像进行基线估算,设置时空基线阈值,并生成连接图。本文空间基线设置为临界基线的3%,时间基线设置为48天,最终形成了289对干涉对,时空基线分布如图3、图4所示。



图 3 时间基线连接图

Fig. 3 Time baseline connection diagram



(3)干涉处理。对所有的干涉像对进行干涉处理, 并通过查看差分干涉结果图, 剔除了 49 对相干性差、 解缠不理想的影像干涉对, 为轨道精炼和重去平, 以及 SBAS 反演估算做好数据准备。

(4)GCP 点筛选。首先通过 PS-InSAR 技术获取 PS 点来作为 GCP 候选点,根据 GCP 点的特性,综合考虑 振幅离差,相干性以及形变速率,来获取 PS 点信息。PS 点振幅离差阈值在 0.25 至 0.4 之间;相干性阈值不能设 置过高,否则处于高山山地的极艰险区域很难获取一定 数量的 PS 点,需要反复试验和调整,使获取的 PS 点数 量满足 GCP 点数量要求; PS 点必须是稳定点,形变速 率需要小于 1 mm/a。因此,本文设置振幅离差阈值*D*, 为 3.5,相干性阈值*T*,为 0.87,形变速率阈值*T*,为±1 mm/a, 共获取了 51 个 PS 点,也就是 51 个 GCP 候选点。然后 结合光学影像查看 51 个 GCP 候选点的位置分布,发现 其中 9 个点没有位于地势较缓的平坦区域,例如图 5 所 示 GCP 点处于高山半坡,将此类 GCP 候选点剔除后最 终得到 42 个稳定的 GCP 点,其结果与人工选取 GCP 点的结果对比如图 6 所示。

(5)轨道精炼与重去平。将筛选得到的 GCP 点转



图 5 结合 Google earth 光学影像筛选剔除的 GCP 点 Fig. 5 GCP points filtered out by Google Earth optical image



图 6 GCP 点选取结果对比(左为人工选取,右为本文方法选取) Fig. 6 Comparison of GCP point selection results (left is manual selection, right is method selection in this paper)

换到 SAR 影像雷达斜坐标系中,采用 3 次轨道精炼多 项式估算轨道误差和相位偏移量,消除斜坡相位,最后 基于控制点对数据进行重去平。

(6)SBAS 反演估算。先是通过第一次反演估算形 变速率和残余地形,并设置相应的小波分解等级去除残 余地形的影响;再是通过第二次反演,进行时间域高通 滤波和空间域低通滤波计算,去除大气相位影响。最终 得到时间序列形变结果。

(7)地理编码。将 SBAS 反演估算得到的形变结果 转换到参考 DEM 坐标系下,最后通过 GTM 软件绘制 成年均地表形变速率图 (图 7)。

3 结果与分析

对比 PS-InSAR 技术、SBAS-InSAR 技术和改进的 SBAS-InSAR 技术的地表形变监测结果,可以发现研究 区域基于 SBAS-InSAR 技术提取的地表形变点密度明 显高于 PS-InSAR 技术获取的地表形变点密度, SBAS-



Fig. 7 Annual surface deformation rate of zheduoshan area

InSAR 技术监测结果中该区域中疑似滑移区域体现得 更加明显和清晰。这是由于位于高山山地地带的极艰 险区域永久性散体较为稀少, PS-InSAR 获取的 PS 点信 息也相对较少。区域内山体海拔较高, 多存在冰雪覆盖 区域, 受气温影响, 地表土壤呈现出较为明显的季节性 反复冻融, 地表形变量往往较大, 在采用单一主影像的 PS-InSAR 技术的长时间基线干涉图中, 这些区域常出 现失相干现象, 难以获得一定数量的 PS 点。通过对比 分析可知, SBAS-InSAR 在该研究区域的监测效果更 好。改进的 SBAS-InSAR 技术的地表形变结果很好的 保留了 SBAS-InSAR 技术的优势, 得到了同样密度较高 的地表形变点, 整体的形变速率结果与 SBAS-InSAR 技 术处理结果基本一致(图 8)。



Fig. 8 Annual surface deformation rate of zheduoshan area with different methods

进一步的分析改进 SBAS-InSAR 技术与 SBAS-InSAR 技术的处理结果,对比两者的形变速率、形变速率精度,如表1、表2所示。

通过对比改进前后的监测结果,该区域的平均形变 速率由-1.208 922 变为-1.099 689 1,标准差从 9.224 748 变为 9.172 168。该区域形变结果表明,人工选取的 GCP 点处于轻微沉降区域,而 GCP 点代表稳定的位置,这使 得使用人工选取 GCP 点的监测结果中形变点沉降速率 相对偏大;而使用精选后 GCP 点的监测结果更接近形 变点的真实沉降速率。并且,在形变速率精度量级上,

表 1 两种时序 InSAR 技术的形变速率统计

 Table 1
 Deformation rate statistics of two time series

 InSAR techniques

	-			-
方法	最小值	最大值	均值	标准差
改进前的 SBAS-InSAR	-154.352 951	140.393 066	-1.208 922	9.224 748
改进后的 SBAS-InSAR	-153.044 235	141.006 891	-1.099 689	9.172 168

表 2 两种时序 InSAR 技术的形变速率精度统计

 Table 2
 Deformation rate accuracy statistics of two time series InSAR techniques

方法	最小值	最大值	均值	标准差
改进前的 SBAS-InSAR	0.143 982	17.381 382	3.851 148	1.401 882
改进后的 SBAS-InSAR	0.142 428	16.711 776	3.091 360	1.279 466

改进后的形变速率精度平均值从改进前的 3.851 148 变 为 3.091 360,标准差从 1.501 882 变为 1.279 466。因此 结果表明,改进后的 SBAS-InSAR 技术的监测结果在形 变速率、形变速率精度上均有较好的改善。高山山地 地带的地理环境条件使得传统 SBAS-InSAR 技术中人 工选取 GCP 点较为困难,而利用筛选得到的永久性散 体点作为 GCP 点来代替人工选取 GCP 点,有助于提高 地表形变监测精度。这说明基于轨道精炼控制点精选 的 SBAS-InSAR 技术在极艰险区域的地表形变监测中 具有更好的适用性。

4 结论

本文对比了 PS-InSAR 技术和 SBAS-InSAR 技术在 折多山区域的地表形变监测结果,发现 SBAS-InSAR 技术在该研究区域获得的地表形变点密度更高,整体效果 更好;又考虑到极艰险区域的地理条件,设计了 GCP 点 精选方案来代替 GCP 人工选点,对 SBAS-InSAR 技术 进行了改进。通过分析,本文得到以下结论:

(1)在极艰险区域的地表形变监测中,SBAS-InSAR 技术能够获取较高地表形变点密度的监测结果,而 PS-InSAR 技术的应用效果不佳。SBAS-InSAR 技术在极 艰险区域比 PS-InSAR 技术更具有应用优势。

(2)本文提出的基于轨道精炼控制点精选的 SBAS-InSAR 技术在极艰险区域的应用中,保留了 SBAS-InSAR 技术在极艰险区域地表形变监测中的优势,取得 较高密度地表形变监测结果的同时,避免了 GCP 人工 选点引起的误差,提高了地表形变监测精度,具有良好 的应用价值。

参考文献(References):

- [1] 王如意.基于SBAS-InSAR的高分辨率地面沉降监测技术 研究[D].北京:中国地质大学(北京), 2015. [WANG Ruyi. The study of land subsidence monitoring technology based on SBAS-InSAR with high resolution[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李达,邓喀中,高晓雄,等.基于SBAS-InSAR的矿区地表 沉降监测与分析[J].武汉大学学报(信息科学版), 2018,43(10):1531-1537. [LI Da, DENG Kazhong, GAO Xiaoxiong, et al. Monitoring and analysis of surface subsidence in mining area based on SBAS-InSAR [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(10): 1531-1537. (in Chinese with English abstract)]
- [3] ROSEN P A, HENSLEY S, JOUGHIN I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry [J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(3): 333 – 382.
- [4] SIMONS M, ROSEN P A. Interferometric synthetic aperture radar geodesy[M]//Treatise on Geophysics. Amsterdam: Elsevier, 2007: 391-446.
- [5] 周超.集成时间序列InSAR技术的滑坡早期识别与预测研究[D].武汉:中国地质大学,2018. [ZHOU Chao. Landslide identification and prediction with the application of time series InSAR[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 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.
- 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.
- [8] 白泽朝,靳国旺,张红敏,等.天津地区Sentinel-1A雷达影像 PSInSAR地面沉降监测[J].测绘科学技术学报,2017,34(3):283-288. [BAI Zechao, JIN Guowang, ZHANG Hongmin, et al. Subsidence monitoring of Tianjin using PSIn SAR technique with sentinel-1A[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2017, 34(3):283-288. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 何平.时序InSAR的误差分析及应用研究[D].武汉:武汉 大学, 2014. [HE Ping. Error analysis and surface deformation application of time series InSAR[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 陈玺. SBAS-InSAR技术在秦州区地表形变监测与滑坡敏感性评价中的应用研究[D]. 兰州:兰州大学, 2018.
 [CHEN Xi. Detecting ground deformation and assessing

lide suscentibility in Oinzhou

landslide susceptibility in Qinzhou district based on SBAS-InSAR technique[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. (in Chinese with English abstract)]

- LIU X J, ZHAO C Y, ZHANG Q, et al. Characterizing and monitoring ground settlement of marine reclamation land of Xiamen new airport, China with sentinel-1 SAR datasets [J].
 Remote Sensing, 2019, 11(5): 585.
- [12] 潘光永,陶秋香,陈洋,等.基于SBAS-InSAR的山东济阳 矿区沉降监测与分析[J].中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 100-106. [PAN Guangyong, TAO Qiuxiang, CHEN Yang, et al. Monitoring and analysis of sedimentation in Jiyang mining area of Shandong Province based on SBAS-InSAR [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 100-106. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王舜瑶, 卢小平, 刘晓帮, 等. 一种顾及永久散射体的
 SBAS InSAR时序地表沉降提取方法[J]. 测绘通报,
 2019(2): 58-62. [WANG Shunyao, LU Xiaoping, LIU

Xiaobang, et al. A SBAS InSAR time series ground deformation extraction approach considering permanent scatterers [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(2): 58-62. (in Chinese with English abstract)]

- [14] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8 – 20.
- [15] 丁伟. PSInSAR点目标提取及相位解缠技术研究[D]. 长沙:中南大学, 2011. [DING Wei. Study of PSInSAR on the technique of points selection and phase unwrapping[D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 刘路遥.基于分布式目标雷达干涉测量的滑坡形变监测
 [D].成都:西南交通大学,2018. [LIU Luyao. Deformation monitoring of landslide based on distributed scatter interferometric synthetic aperture radar[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese with English abstract)]