

# 永久散射体合成孔径雷达干涉测量技术在中缅油气管道沉降监测中的应用

黄锐<sup>1</sup>, 韩建强<sup>1</sup>, 李进田<sup>2\*</sup>, 纪润池<sup>2</sup>, 吴磊<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中油国际管道公司, 北京 102200;

<sup>2</sup>北京深蓝空间遥感技术有限公司, 北京 100101

**摘要** 中缅油气管道的沉降导致管道弯曲、变形甚至破裂,因此开展管道沉降监测对于管道的建设与维护具有重要意义。永久散射体合成孔径雷达干涉测量(PS-InSAR)技术具有全天时、全天候、监测范围广和精度高的优势,以中缅天然气管道——若开山段两侧 3 km 缓冲区范围为研究区域,采用 PS-InSAR 方法获取异常形变区域,然后进一步结合研究区的坡度、坡向、植被和土壤等多源数据信息建立风险判定模型对中缅油气管道进行滑坡风险评估,并判定滑坡及管道风险等级。主要结论为: 1) 基于升、降轨融合的 PS-InSAR 方法进行形变监测,共获取 90 个形变较大区域,平均形变量在 -25~25 mm 之间,大部分区域仍趋于稳定。2) 基于坡度、坡向等多源数据进行滑坡风险等级划分、管道运行安全等级划分,结果显示滑坡一级风险区 13 个,二级风险区 18 个,三级风险区 59 个;管道一级风险区 10 个,二级风险区 14 个,三级风险区 66 个。

**关键词** 遥感与传感器; 永久散射体合成孔径雷达干涉测量技术; 地面沉降; 中缅油气管道; 升降轨融合; 风险等级  
中图分类号 TP79 文献标志码 A DOI: 10.3788/LOP202259.1628007

## Applications of Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar Technology for Subsidence Monitoring of Sino-Myanmar Oil and Gas Pipelines

Huang Rui<sup>1</sup>, Han Jianqiang<sup>1</sup>, Li Jintian<sup>2\*</sup>, Ji Runchi<sup>2</sup>, Wu Lei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sino-Pipeline International Company, Beijing 102200, China;

<sup>2</sup>Beijing Deep Blue Space Remote Sensing Technology Co., Ltd., Beijing 100101, China

**Abstract** Subsidence of the Sino-Myanmar oil and gas pipelines leads to pipeline bending, deformation, and even rupture. Therefore, pipeline settlement monitoring is of great significance for pipeline construction and maintenance. The persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar (PS-InSAR) technology has the advantages of all-day use, all-weather use, wide monitoring range, and high precision. Taking the 3-km buffer zone on both sides of the Ruokai mountain section of the Sino-Myanmar natural gas pipeline as the study area, the abnormal deformation area is obtained by the PS-InSAR method. Further, combined with multisource data such as slope, slope direction, vegetation, and soil types in the study area, a risk assessment model is established to evaluate the landslide risk for the Sino-Myanmar oil and gas pipelines and determine the risk level of pipeline subsidence. The main conclusions are as follows: The PS-InSAR method based on the fusion of ascending and descending orbits is used for deformation monitoring, and a total of 90 areas with large deformation are obtained. The average variation is between -25 mm and +25 mm, and most areas are stable. Based on slope, aspect, and other multisource data, the landslide risk level and pipeline operation safety level are determined. The results show that there are 13 first-level landslide risk areas, 18 second-level landslide risk areas, and 59 third-level landslide risk areas, and there are 10 first-level pipeline risk areas, 14 second-level pipeline risk areas, and 66 third-level pipeline risk areas.

**Key words** remote sensing and sensors; persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar technology; land subsidence; Sino-Myanmar oil and gas pipelines; fusion of ascending and descending orbits; risk level

## 1 引言

中缅油气管道工程<sup>[1]</sup>是我国四大能源进口通道之

一,将资源较为丰富的西亚、非洲的石油及缅甸近海天然气输往中国西南地区,是我国“一带一路”倡议在缅甸实施的先导项目。油气管道铺设线路所经区域地形条

收稿日期: 2021-08-04; 修回日期: 2021-09-16; 录用日期: 2021-09-24

通信作者: \*Lijintian\_2021@163.com

件复杂,受到地质灾害的影响较大,当管道受外力干扰时,会引起沉降不均匀,在沉降作用下造成管道弯曲、变形甚至破裂。地面沉降、凹陷或坍塌等会给经过或坐落于其上的长输管道造成极大的威胁和危害,严重影响管道线路的稳定和安全,并且已成为影响区域经济和社会可持续发展的重要因素。因此,对长输管道所经区域进行大范围、长时间和高精度的地面形变监测、风险识别与安全预警,对于管道的建设与维护具有重要意义。

针对工程或局部区域的位移形变监测技术研究一般采用传统接触式测量方法<sup>[2]</sup>,如水准测量、全球定位系统(GPS)测量<sup>[3]</sup>和管道外壁布设光纤传感器<sup>[4]</sup>等,虽然上述方法的精度较高,但其缺点也显而易见,如:水准测量具有内外业工作繁重、监测范围有限、时效性较差等缺点;固定永久GPS仪器成本高,且不能大范围监测。近年来,随着空间遥感技术的不断发展,合成孔径雷达干涉测量(InSAR)作为一种对地观测的新型遥感技术,实现了自空间向全球地表进行长时列、高精度的监测<sup>[5-6]</sup>。特别是永久散射体合成孔径雷达干涉测量(PS-InSAR)技术在大范围、长时间序列地面形变监测的工作领域内发挥着特有的优势,在地面沉降监测中的精度可达到毫米级别<sup>[7-8]</sup>。

目前针对油气管道的形变监测已有相关的研究,如杨振涛等<sup>[9]</sup>对高压天然气管道采用了结合直接监测点和间接监测点的沉降检测方法,指出间接监测点取代直接监测点进行管道监测是可行的。吴波等<sup>[10]</sup>根据相关的分析软件,对地面覆土中发生沉降的管道的安全状态进行了分析,同时对管道沉降过程可能产生的管体裂纹对其安全性的影响进行了定量分析。张昊<sup>[11]</sup>通过分析、研究天然气埋地钢管的周围不均匀沉降所引起的形变,提出了适当的沉降计算方法和计算公式。李正胜等<sup>[12]</sup>采用自行研发的“管道-地质体一体化”的三维计算模型,对埋地油气管道经过的采空区的顶板不同深度的岩层位移情况进行实时、连续监测及分析。在基于InSAR方法的油气管道形变监测方面,孙伟等<sup>[13]</sup>利用小基线集干涉叠加技术提取输油管道重点区段地表形变信息。

PS-InSAR方法在油气管道地质形变监测方面具有突出优势,因此本文基于2018年6月~2020年9月中缅天然气管道升降轨影像,采用PS-InSAR方法获取平均形变速率,并针对研究区域内形变异常区域,分析其对中缅天然气管道——若开山段的滑坡风险危害评估,证明了本文方法适用于油气管道的形变监测。

## 2 PS-InSAR原理与数据处理流程

### 2.1 D-InSAR原理

通过两景或多景合成孔径雷达(SAR)数据进行干涉测量获取地物目标形变量的方法,即为合成孔径雷达差分干涉测量(D-InSAR)技术。D-InSAR原理如图1所示,其中点 $P$ 和 $P'$ 为卫星两次观测的同一地

面目标点, $S_1$ 和 $S_2$ 为卫星两次过境的位置, $S_1$ 和 $S_2$ 与 $P$ 点的距离分别为 $R_1$ 和 $R_2$ , $S_1$ 和 $S_2$ 之间的距离为基线,基线与水平线夹角为 $\alpha$ , $S_1$ 距离地面的高度 $H$ 是已知的, $\Delta d$ 为点 $P$ 的位移量,其主要与形变相位有关。但D-InSAR技术会受到时空失相关和大气延迟的影响。

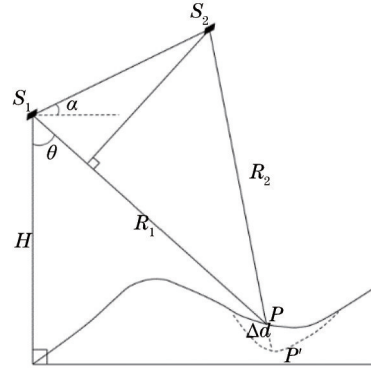


图1 D-InSAR基本原理图

Fig. 1 Basic schematic diagram of D-InSAR

### 2.2 PS-InSAR原理

为了避免D-InSAR技术受时空失相关和大气延迟的影响,PS-InSAR技术利用不同时间获取的覆盖同一区域的多景SAR影像,通过对影像的幅度信息或相位信息进行统计分析,选取不受时间、空间基线去相关和大气延迟影响的永久散射体(PS)点<sup>[14-15]</sup>,再利用PS点的相位变化特征获取时间序列上的地表形变信息<sup>[16-17]</sup>。

假设研究区域内有 $N+1$ 景不同时间段的SAR影像,在综合考虑时间基线、空间基线以及多普勒质心频率后优选出一景作为主影像,使相干性之和达到最大,剩余的 $N$ 景作为辅影像分别与主影像进行配准和干涉处理,并引入外部数字高程模型(DEM)去除地形相位,可以得到 $N$ 幅干涉影像对,从而获取SAR影像的振幅信息和相位信息。设 $x$ 为第 $i$ 个干涉对上的像元,则 $x$ 像元的相位可表示为

$$\varphi_{\text{int},x,i} = W \{ \phi_{\text{top},x,i} + \phi_{\text{def},x,i} + \phi_{\text{atm},x,i} + \Delta\phi_{\text{orb},x,i} + \Delta\phi_{\theta,x,i} + \phi_{\text{n},x,i} \}, \quad (1)$$

式中: $\varphi_{\text{int},x,i}$ 为 $x$ 像元的相位; $\phi_{\text{top},x,i}$ 为地形相位; $\phi_{\text{def},x,i}$ 为地表形变相位; $\phi_{\text{atm},x,i}$ 为大气延迟相位; $\Delta\phi_{\text{orb},x,i}$ 为轨道误差引起的相位; $\Delta\phi_{\theta,x,i}$ 为视角误差引起的残余相位; $\phi_{\text{n},x,i}$ 为由热噪声、配准误差等引起的噪声相位。 $\phi_{\text{def},x,i}$ 为本文需要最终获取的形变信息相位,因此,为了获取 $\phi_{\text{def},x,i}$ ,需要把除形变信息相位以外的其他误差相位从干涉相位中剔除。在通常情况下,平地效应、几何相位和地形相位可以通过精密轨道和高精度DEM去除<sup>[18]</sup>。由于大气在空间上相干,而在时间上是失相干的,因此,在时序分析中通常把大气效应忽略不计。

### 2.3 PS-InSAR数据处理流程

利用PS-InSAR方法进行地表形变监测,以获取

测区在指定时间段内的历史形变信息。图 2 为 PS-InSAR 数据处理流程图,其主要处理步骤为:

- 1) 选取  $N+1$  幅 SAR 影像,以其中一幅作为主影像,其余作为辅影像,分别与主影像配准并进行干涉处理,获得  $N$  幅干涉图;
- 2) 利用已知 DEM 数据,对  $N$  幅干涉图进行差分干涉处理,得到  $N$  幅差分干涉图;
- 3) 从定标和配准后的  $N+1$  幅 SAR 影像中选取 PS 点;
- 4) 根据选取的 PS 点和  $N$  幅差分干涉图,得到 PS

点的差分干涉相位集;

- 5) 根据地面形变情况(线性形变和非线性形变),建立合理的差分干涉相位模型;
- 6) 根据差分干涉相位函数模型和 PS 点的差分干涉相位集,得到各 PS 点的形变速率、DEM 误差和大气相位;
- 7) 将得到的 PS 点的形变量、DEM 误差和大气相位重新应用于模型,对其进行修正;
- 8) 经过质量分析,得到最终的形变序列和 DEM 误差。

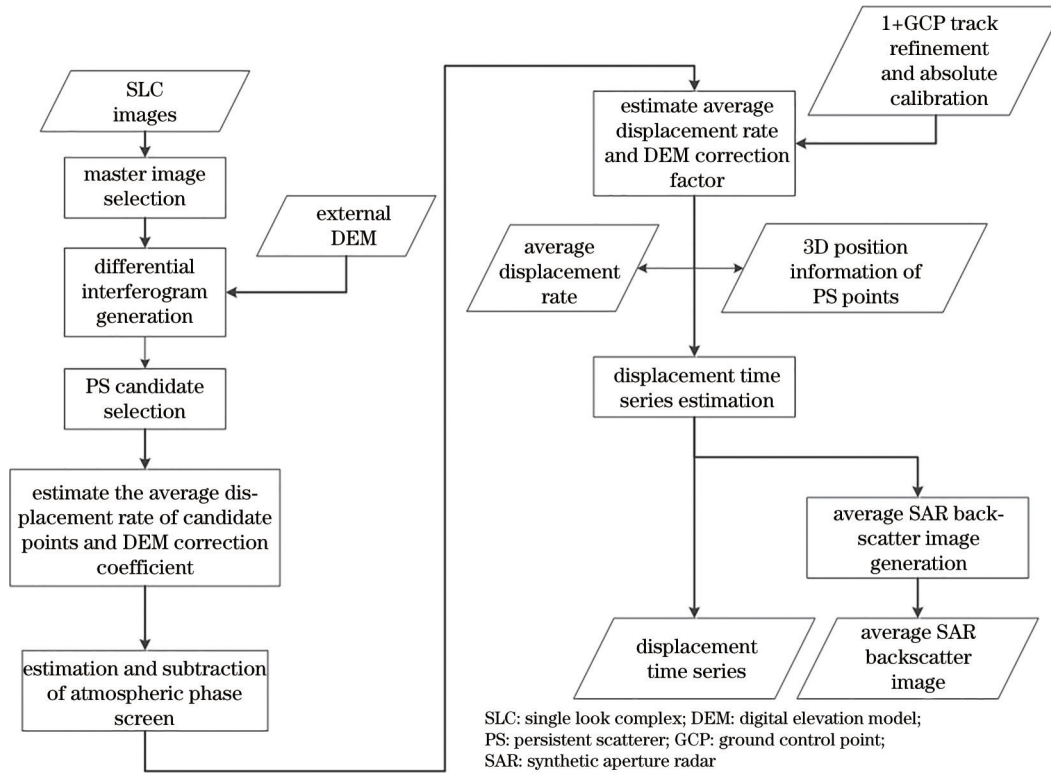


图 2 PS-InSAR 技术流程图

Fig. 2 Flow chart of PS-InSAR technology

### 3 区域概况及数据

监测区域为中缅天然气管道——若开山段。该段土壤类型主要为强淋溶土、始成土、冲击土。该区域地形起伏大,具有“山高坡陡谷深”的特点,由于缅甸的环境气候导致夏季雨量充沛,汛期管道周边极易发生地质灾害,从而影响管道的稳定性。一旦事故发生,极易造成巨大的经济损失和社会负面影响,造成严重的后果。故极有必要进行实时动态形变监测。

本文选取中缅天然气管道——若开山段作为目标区域,采用从欧洲航天局(ESA)官网获取的 2018 年 6 月—2020 年 9 月超过 2 a 的升降轨数据共 128 景(其中升轨数据共 72 景,降轨数据共 56 景,由于管道里程较长,需两幅同期影像方可覆盖,影像范围与管线相对位置关系如图 3 所示)覆盖中缅天然气管道——若开山段的 Sentinel-1A 卫星数据作为本次沉降监测的数据源。数据源基本参数如图 3、表 1、表 2 所示。

表 1 升轨影像信息

Table 1 Ascending orbit image information

Serial number	Image acquisition date	Number of images in the same period	Serial number	Image acquisition date	Number of images in the same period
1	20180601	2	19	20190819	2
2	20180625	2	20	20190912	2
3	20180719	2	21	20191006	2

表1 (续)

Serial number	Image acquisition date	Number of images in the same period	Serial number	Image acquisition date	Number of images in the same period
4	20180812	2	22	20191030	2
5	20180905	2	23	20191123	2
6	20180929	2	24	20191217	2
7	20181011	2	25	20200110	2
8	20181128	2	26	20200203	2
9	20181222	2	27	20200227	2
10	20190115	2	28	20200322	2
11	20190208	2	29	20200415	2
12	20190304	2	30	20200509	2
13	20190328	2	31	20200602	2
14	20190421	2	32	20200626	2
15	20190515	2	33	20200720	2
16	20190608	2	34	20200813	2
17	20190702	2	35	20200906	2
18	20190726	2	36	20200930	2

表2 降轨影像信息

Table 2 Descending orbit image information

Serial number	Image acquisition date	Number of images in the same period	Serial number	Image acquisition date	Number of images in the same period
1	20180809	2	15	20191120	2
2	20180902	2	16	20191214	2
3	20180926	2	17	20190107	2
4	20181020	2	18	20200131	2
5	20181101	2	19	20200224	2
6	20181125	2	20	20200319	2
7	20181219	2	21	20200412	2
8	20190112	2	22	20200424	2
9	20190124	2	23	20200530	2
10	20190205	2	24	20200705	2
11	20190816	2	25	20200729	2
12	20190909	2	26	20200822	2
13	20191003	2	27	20200915	2
14	20191027	2	28	20200927	2

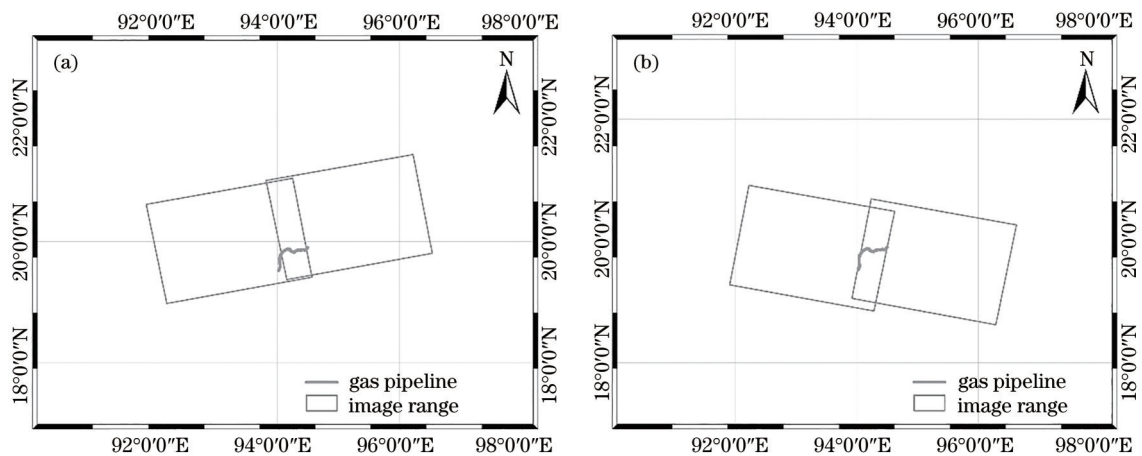


图3 影像范围与管线位置关系示意图。(a)升轨影像范围与管线位置关系;(b)降轨影像范围与管线位置关系

Fig. 3 Schematic diagram of relationship between image range and pipeline position. (a) Relationship between image range of ascending orbit and pipeline position; (b) relationship between image range of descending orbit and pipeline position

## 4 基于升、降轨融合的 PS-InSAR 处理结果及分析

### 4.1 基于升、降轨的 PS-InSAR 处理结果及分析

基于 Sentinel-1A 卫星系统获取监测区 2018 年 6 月—2020 年 9 月约 2 a 间的长时间雷达干涉图像序列,利用基于升、降轨融合的 PS-InSAR 方法,进行中缅天然气管道——若开山段沿线两侧 3 km 缓冲区范

围内的地表形变监测。利用振幅离差指数阈值法从升降轨数据中总共提取了研究区域内各 33665 和 54917 个 PS 点。采用 Delaunay 三角网法对前面获取的 PS 点进行解算,即相位解缠,构建相关的数学模型,通过对模型的求解可以得到所有 PS 点的形变速率。分别对升、降轨 PS 点的形变速率进行统计分析获得形变速率分布情况,如图 4 所示,将 PS 点与卫星影像叠加显示获得该研究区域的年平均形变速率,如图 5 所示。

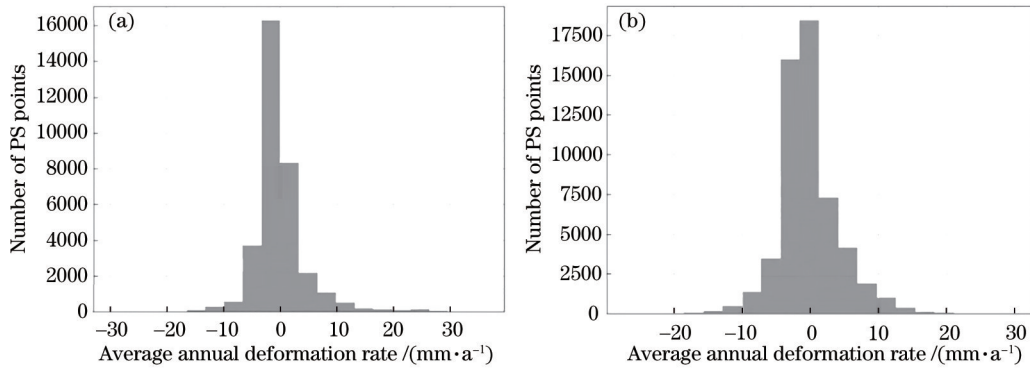


图 4 升轨和降轨的 PS 点年均形变速率统计直方图。(a)升轨;(b)降轨

Fig. 4 Histograms of average annual deformation rate of PS points of ascending and descending orbits. (a) Ascending orbit; (b) descending orbit

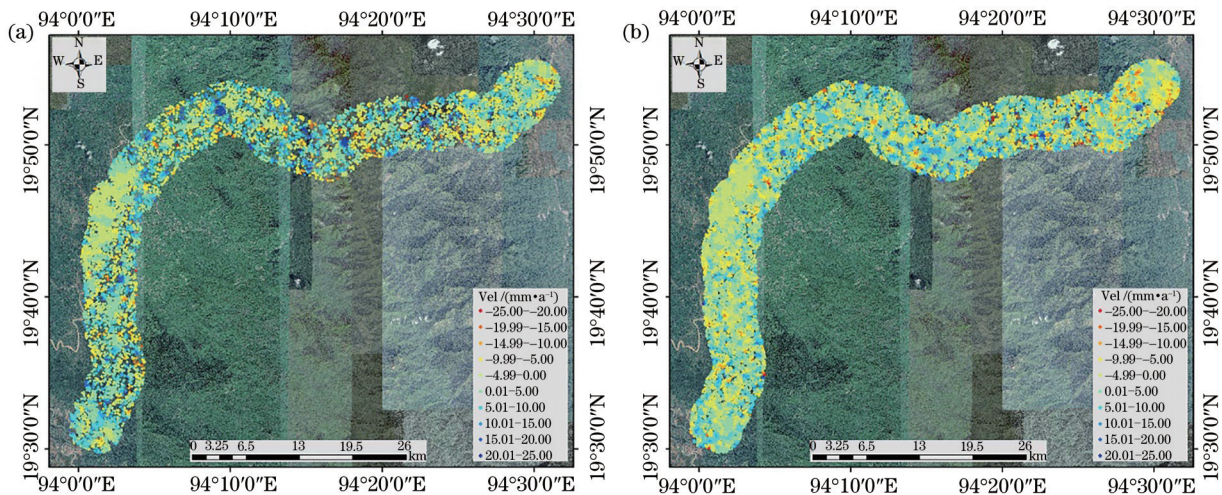


图 5 中缅天然气管道——若开山段 PS 点形变分布图。(a)升轨 PS 点形变分布图;(b)降轨 PS 点形变分布图

Fig. 5 Deformation distribution maps of PS points of Sino-Myanmar natural gas pipeline—Rakayama section. (a) Deformation distribution map of PS points of ascending orbit; (b) deformation distribution map of PS points of descending orbit

从图 4(a)和图 5(a)中可以获得基于升轨数据的 PS-InSAR 处理结果:直方图显示绝大多数 PS 点的年均形变速率在 5 mm/a 以内,综合判断该段天然气管道形变整体较为稳定,局部有形变较大的潜在地灾隐患区域。管道左右两侧各 3 km 内共提取到 33665 个 PS 点,形变速率的变化范围为  $-29.62 \sim 29.96$  mm/a,累计形变量的值域为  $-66.36 \sim 67.12$  mm。

从图 4(b)和图 5(b)中可以获得基于降轨数据的 PS-InSAR 处理结果:直方图显示绝大多数 PS 点的年均形变速率在 5 mm/a 以内,综合判断该段天然气管道

整体较为稳定,局部有形变较大的潜在地灾隐患区域。降轨影像由于卫星拍摄的原因,获取的影像在监测期的某些月份上存在缺失,有效监测时间较升轨稍短几个月。在管道左右两侧各 3 km 内共提取到 54917 个 PS 点,形变速率的变化范围为  $-27.03 \sim 29.66$  mm/a,累计形变量的值域为  $-60.55 \sim 66.44$  mm。

### 4.2 基于升、降轨影像的融合结果与分析

由于基于升、降轨影像获取的时序 SAR 结果中的 PS 点并非完全对应,为保证结果可参与融合模型的计算,需保证一一对应,因此有必要进行插值处理,以得

到监测区域的完整的面形变。插值基于两点假设:其一,在局部区域地表的形变存在一定的连续性;其二,随着地形或者地质条件、地物种类的变化等因素的影响,地表形变在这些边界处也会表现出一定的边界,形变的情况异常复杂,其与所在环境的关系非常大,是众多因素综合影响的结果。

采用的插值模型,充分考虑连续边界与地形变化的影响,将距离与DEM等数据添加到模型中,以求得到一个比目前常用的插值模型更好的一个效果。将升、降轨数据提取得到的PS点分别与电子地图叠加显示获得该研究区域的年平均沉降速率,如图6所示。

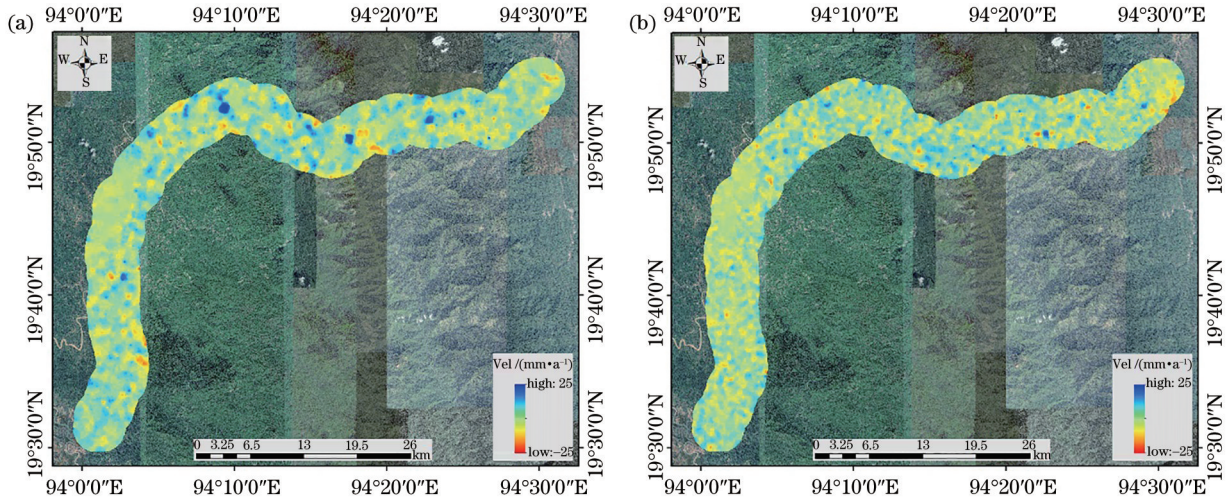


图 6 基于升、降轨影像拟合得到的面形变结果分布图。(a)基于升轨影像;(b)基于降轨影像

Fig. 6 Distributions of surface deformation results based on image fitting of ascending and descending orbits. (a) Based on ascending orbit; (b) based on descending orbit

垂向形变作为地表形变位移中一个重要的形变分量,需要相当重视。使用基于三维融合模型提取垂向形变,在三维模型中,依赖形变场特征与两组已知的形变值,可提取近似垂向形变结果,该结果对风险区的划分影响极大。基于解算模型,对升、降轨时序形变结果进行融合提取的形变结果如图7所示。

这个稍大。对一些形变速率绝对值达到 10 mm/a 以上的区域进行标记,标记结果如图8所示。

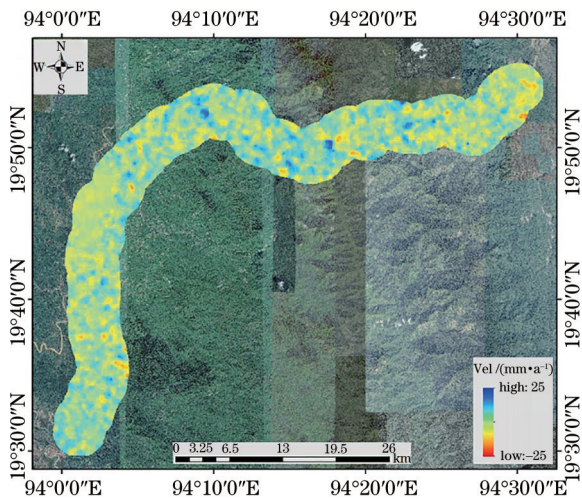


图 7 基于升、降轨融合获得的垂向形变结果图

Fig. 7 Vertical deformation results obtained based on fusion of ascending and descending orbits

从基于升、降轨融合获得的垂向形变结果图,可以看出融合得到的形变结果显示监测区域的年均形变速率基本位于-25 mm/a到25 mm/a之间,少数区域比

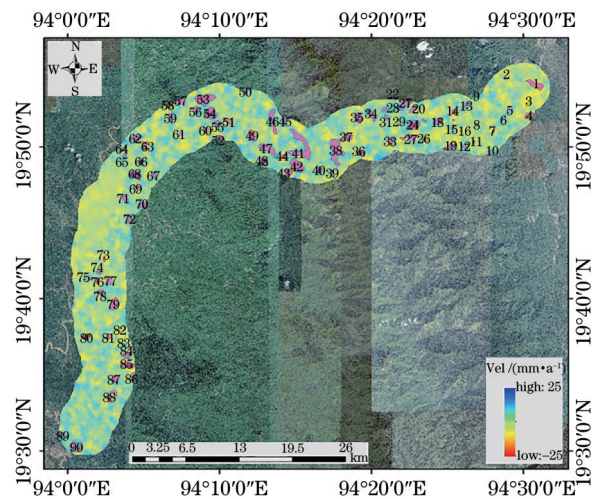


图 8 局部形变异常区分布图

Fig. 8 Distribution map of local deformation abnormal area

## 5 基于多源数据的风险区划分

产生山体滑坡从而危害天然气管道的重要因素有很多,例如:坡度、坡向、土壤类型、植被覆盖率、天然气管道距道路的最近距离、天然气管道距河道的最近距离等,将这些影响因子作为模型判断风险的输入特征,从而对形变较大的区域进行风险划分。通过相应技术提取出研究区域内多源影响因子的信息,如图9(a)~9(f)所示。

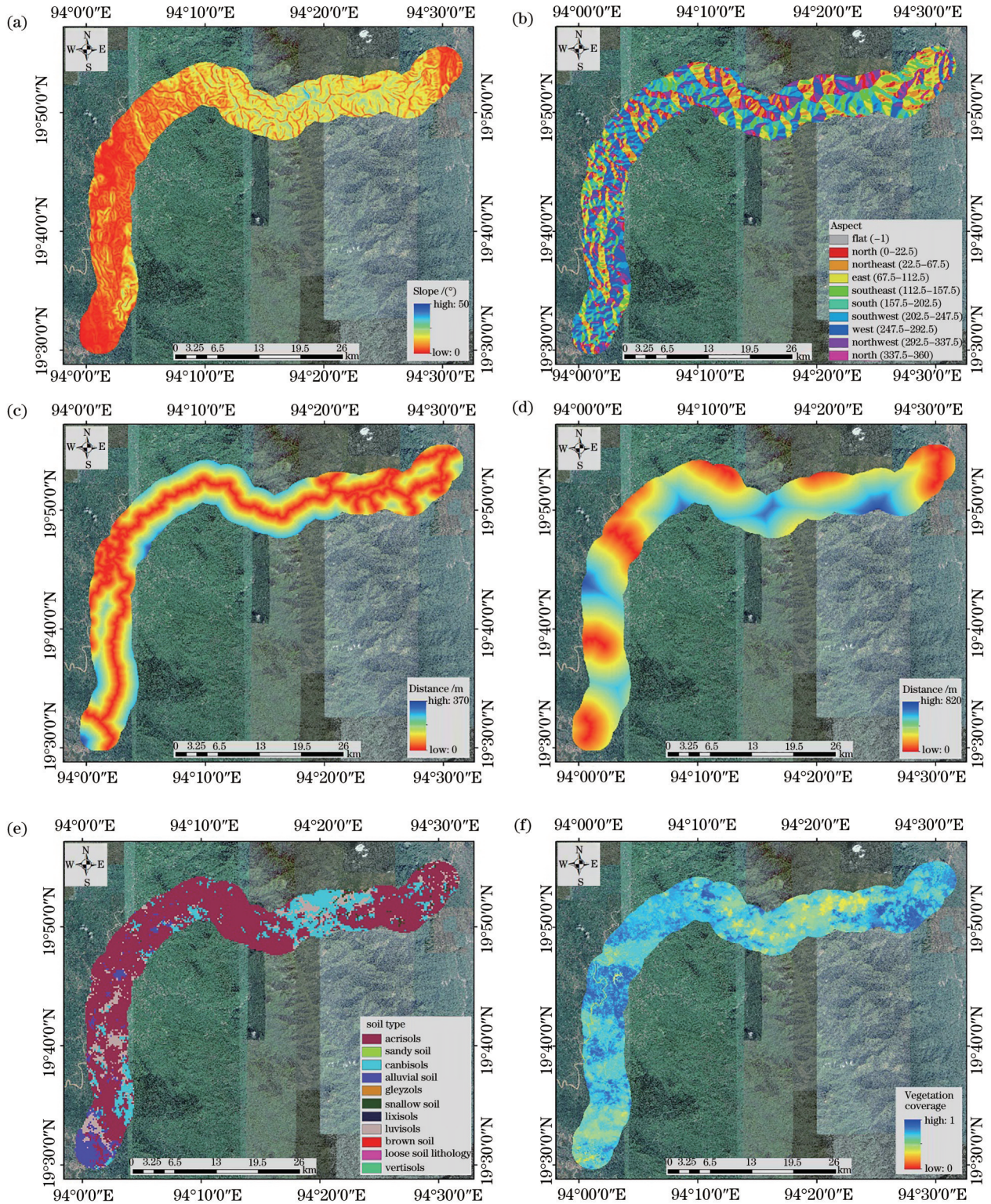


图 9 研究区域多源数据信息获取结果。(a)坡度数据信息;(b)坡向数据信息;(c)距道路最短距离信息;(d)距河道最短距离信息;(e)土壤类型信息;(f)植被覆盖率信息

Fig. 9 Results of multi-source data information acquisition in study area. (a) Slope data information; (b) aspect data information; (c) information on the shortest distance from the road; (d) information on the shortest distance from the river; (e) soil type information; (f) vegetation coverage information

### 5.1 基于模型结果的分析区内主要形变区滑坡风险等级划分

图 10 为滑坡风险区分布图。经过分析,形变较大的区域共计 90 个,叠加多源数据,经过模型计算后,滑

坡一级风险区和滑坡二级风险区,最后滑坡风险等级划分情况为:滑坡一级风险区 13 个,如图 11(a)所示;滑坡二级风险区 18 个,如图 11(b)所示;滑坡三级风险区 59 个(滑坡三级风险区信息可参考图 8)。

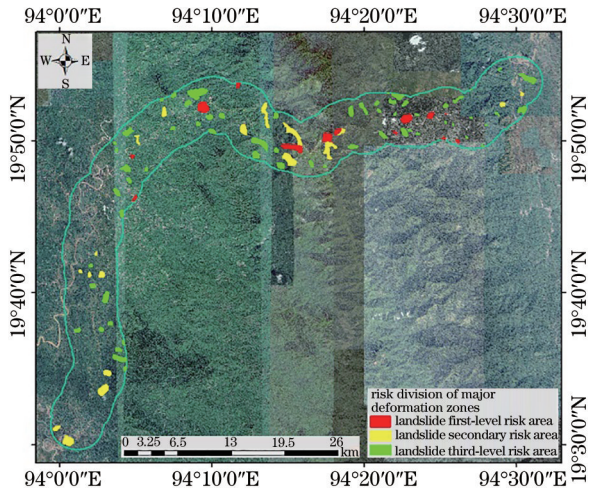


图 10 滑坡风险区分布图

Fig. 10 Distribution map of landslide risk area

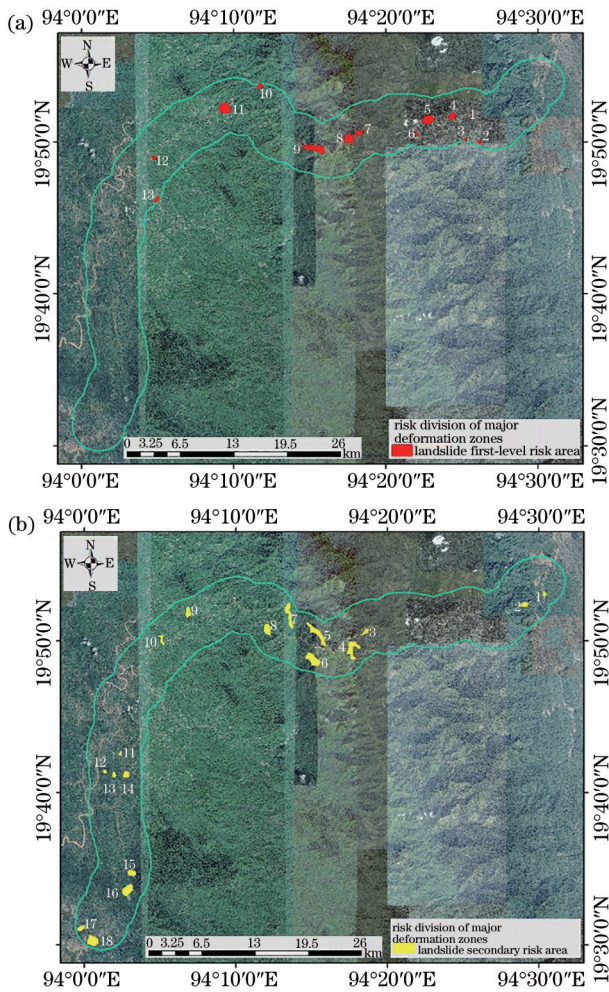


图 11 滑坡一、二级风险区分布图。(a)滑坡一级风险区分布图;(b)滑坡二级风险区分布图

Fig. 11 Distribution map of first and second landslide risk areas.

(a) Distribution map of landslide first-level risk area;

(b) distribution map of landslide secondary risk area

### 5.2 基于模型结果的分析区内主要形变区管道危害等级划分

图 12 为管道风险区分布图。经过分析,形变较大

的区域共计 90 个,叠加多源数据,经过模型计算后,少数形变较大区域归为管道一级风险区和管道二级风险区,最后管道风险等级划分情况为:管道一级风险区 10 个,如图 13(a)所示;管道二级风险区 14 个,如图 13(b)

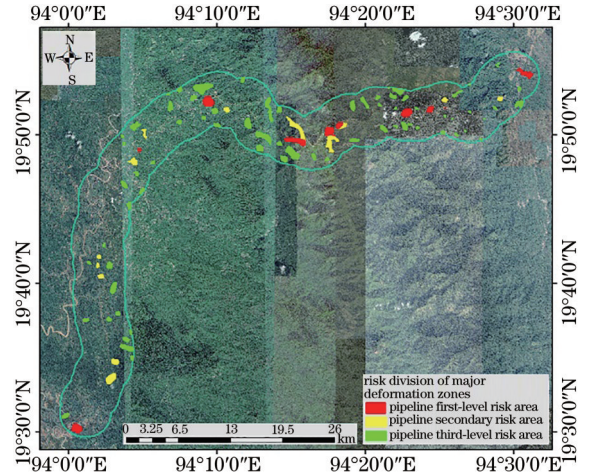


图 12 管道风险区分布图

Fig. 12 Distribution of pipeline risk areas

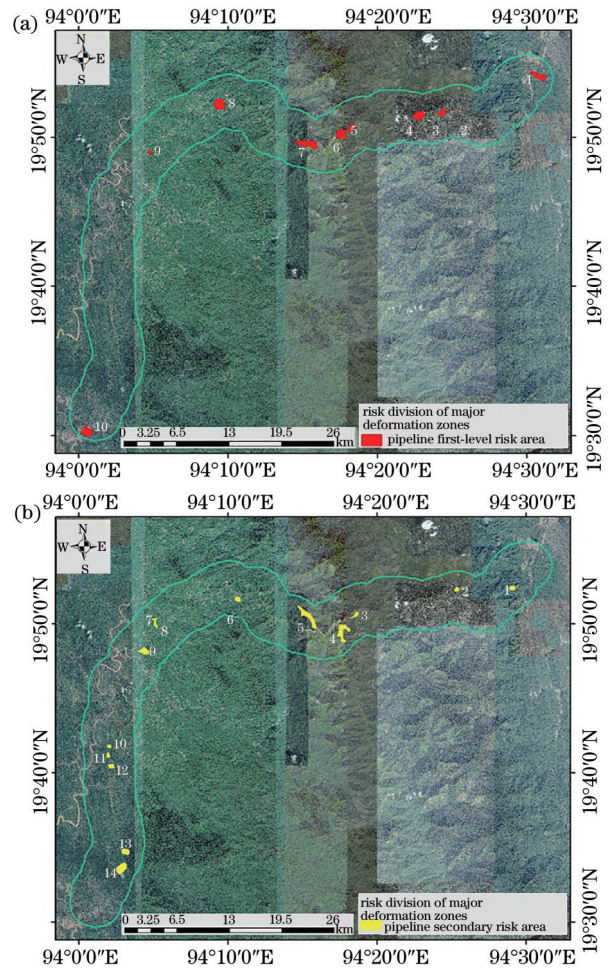


图 13 管道一、二级风险区分布图。(a)管道一级风险区分布图;(b)管道二级风险区分布图

Fig. 13 Distribution of first and second pipeline risk areas.

(a) Distribution map of pipeline first-level risk area;

(b) distribution map of pipeline secondary risk area



所示;管道三级风险区 66 个(管道三级风险区信息可参考图 8)。

## 6 结 论

PS-InSAR 技术在大范围地面沉降监测方面具有其独特的优势,其大时间跨度、高精度的形变监测能力使得该技术越来越受关注,与传统的形变监测方法相比,大大减少了人力和物力,提高了形变监测的效率。管道作为输送油气的重要途经,由于其埋设地周边地质情况复杂,很容易受到一种常见的滑移地质现象——滑坡的影响,一旦事故发生,常常会给人们带来很大的麻烦,甚至是毁灭性的灾难。考虑需实现对整个管线进行沉降监测,故很适合使用 PS-InSAR 技术去对其进行研究。

本文以中缅天然气管道——若开山段为例,简要介绍了 PS-InSAR 技术监测地面沉降的原理和数据处理流程,获取了研究区域内的异常形变区域,并结合研究区的坡度、坡向、植被和土壤等多源数据信息建立风险判定模型对中缅油气管道进行滑坡风险评估并判定滑坡及管道风险等级,得出结论如下:

1) 基于升轨 SAR 影像对中缅天然气管道——若开山段两侧 3 km 缓冲区区域进行形变监测,共发现 45 个形变较大区域,研究区域内年均形变速率在  $-29.62 \sim 29.96$  mm/a 之间,大部分区域处于稳定状态;

2) 基于降轨 SAR 影像对中缅天然气管道——若开山段两侧 3 km 缓冲区区域进行形变监测,共发现 58 个形变较大区域,研究区域内年均形变速率在  $-27.03 \sim 29.66$  mm/a 之间,大部分区域处于稳定状态;

3) 基于升、降轨 SAR 影像融合模型对研究区域进行形变监测,共发现 90 个形变较大区域,研究区域内年均形变量在  $-25 \sim 25$  mm 之间,大部分区域仍趋于稳定;

4) 基于研究区域内的坡度、坡向、土壤类型、植被覆盖率、管道距道路的最近距离、管道距河道的最近距离等多源数据信息建立模型,基于模型对研究区域内较大形变区进行滑坡风险等级划分,划分情况为:滑坡一级风险区 13 个,滑坡二级风险区 18 个,滑坡三级风险区 59 个。基于模型对研究区内的管道进行管道运行安全的风险等级划分,划分情况为:管道一级风险区 10 个,管道二级风险区 14 个,管道三级风险区 66 个。

## 参 考 文 献

[1] 王学军, 陈怡静, 余志峰, 等. 中缅油气管道工程建设难点与创新设计[J]. 油气储运, 2014, 33(10): 1039-1046.  
Wang X J, Chen Y J, Yu Z F, et al. Construction difficulties and technical innovation of the Myanmar-China Oil and Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(10): 1039-1046.

[2] 徐靓, 程刚, 朱鸿鹄. 基于空天地一体化的滑坡监测技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0900006.  
Xu L, Cheng G, Zhu H H. Research review of landslide monitoring methods based on integration of space-air-ground-interior[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0900006.

[3] 孙静, 张伟. 改进正交搜索优化 GPS 信号精捕获[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 131206.  
Sun J, Zhang W. Fast and precise acquisition of GPS signal optimized by improved orthogonal search[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 131206.

[4] 毅力琦, 丁克勤, 钱才富, 等. 长输管道沉降变形分布式监测方法[J]. 无损检测, 2011, 33(11): 55-57.  
Yi L Q, Ding K Q, Qian C F, et al. Distributed monitoring method of subsidence deformation of long-distance pipeline[J]. Nondestructive Testing, 2011, 33(11): 55-57.

[5] 何洁, 陈欣. 基于非线性相关信息熵的 SAR 图像多分辨率选择及目标识别[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(22): 221020.  
He J, Chen X. Multi-resolution selection of SAR images and target recognition based on nonlinear correlation information entropy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(22): 221020.

[6] 李佳慧, 王晓晨. 高分三号全极化 SAR 散射特性分析与精度评价[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0310002.  
Li J H, Wang X C. Analysis and accuracy evaluation of scattering characteristics of GF-3 full-polarized SAR[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0310002.

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

[8] 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.

[9] 杨振涛, 李晓东, 李晓. 管道沉降监测与应用研究[J]. 上海地质, 2006, 27(2): 45-48.  
Yang Z T, Li X D, Li X. Pipeline's sedimentation monitoring and its application studying[J]. Shanghai Geology, 2006, 27(2): 45-48.

[10] 吴波, 顾先凯, 马人杰, 等. 基于 ANSYS 的油气管道沉降监测分析[J]. 管道技术与设备, 2019(1): 8-12.  
Wu B, Gu X K, Ma R J, et al. Monitoring and analysis of oil and gas pipeline settlement based on ANSYS[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2019(1): 8-12.

[11] 张昊. 天然气埋地管道的允许沉降变形量计算[J]. 上海煤气, 2010(4): 14-15, 46.  
Zhang H. Underground natural gas pipeline allowable settlement deformation calculation[J]. Shanghai Gas, 2010(4): 14-15, 46.

[12] 李正胜. 采空区埋地油气管道变形监测及稳定性分析[J]. 煤矿安全, 2019, 50(2): 195-198.  
Li Z S. Stability analysis and deformation monitoring of buried pipelines in underground mined out zone[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(2): 195-198.

- [13] 孙伟, 刘峻峰, 高海英, 等. 输油管道重点区段 SBAS-InSAR 地质灾害监测研究[J]. 石油与天然气化工, 2021, 50(4): 140-146.  
Sun W, Liu J F, Gao H Y, et al. Research on SBAS-InSAR geological disaster monitoring in key sections of oil pipelines[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2021, 50(4): 140-146.
- [14] 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 D R, Liao M S, Wang Y. Progress of permanent scatterer interferometry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(8): 664-668.
- [15] 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.
- [16] 李勇发, 左小清, 熊鹏, 等. PS-InSAR 技术支持下的滇中地区高速公路灾害识别[J]. 测绘科学, 2021, 46(6): 121-127, 135.  
Li Y F, Zuo X Q, Xiong P, et al. Highway disaster recognition in central Yunnan area supported by PS-InSAR technology[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(6): 121-127, 135.
- [17] 陈强. 基于永久散射体雷达差分干涉探测区域地表形变的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.  
Chen Q. Detecting regional ground deformation by differential SAR interferometry based on permanent scatterers[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [18] Costantini M, Falco S, Malvarosa F, et al. Persistent scatterer pair interferometry: approach and application to COSMO-SkyMed SAR data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(7): 2869-2879.