

辽河油田区 InSAR 形变监测与开采参数反演

王子倩, 杨成生, 侯祖行, 张雪, 丁慧兰

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要:针对辽河油田区地表形变特征及变形趋势不明的问题,利用 SBAS-InSAR 和 MSBAS-2D 技术对该区 2019—2021 年地表多维形变特征进行监测,并将 Okada 矩形位错模型用于典型油田开采区储层参数反演。结果表明:研究区曙光采油厂、欢喜岭采油厂和锦州采油厂均存在因石油开采导致的地面沉降,其中曙光采油厂两年内累积形变达 -330 mm,沉降漏斗最大垂直形变和水平位移分别为 -150 和 55 mm,其形变量之比约为 $3:1$ 。利用 Okada 矩形位错模型反演曙光采油厂区域油层深度为 $1\ 642.22$ m,与实际油层深度接近,适用于该区域油田储层参数反演。此外油气开采与周缘的地震事件无明显的相关关系。该方法能较为全面地监测辽河油田区地表形变特征,可为该区油气生产及沉降灾害防治提供参考。

关键词:辽河油田区;地面沉降监测;储层参数反演;二维形变分解;Okada 矩形位错模型

中图分类号:P237; P642.26

文献标志码:A

InSAR deformation monitoring and extraction parameter inversion in Liaohe Oilfield Area

WANG Ziqian, YANG Chengsheng, HOU Zuhang, ZHANG Xue, DING Huilan

(School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to solve the problem of unclear surface deformation characteristics and deformation trend in Liaohe Oilfield Area, this paper uses SBAS-InSAR technology and MSBAS-2D technology to monitor the multidimensional surface deformation characteristics from 2019 to 2021 in this area, and uses Okada rectangular dislocation model to invert reservoir parameters in typical oilfield exploitation areas. The results show that Shuguang Oil Production Plant, Huanxiling Oil Production Plant and Jinzhou Oil Production Plant in the study area all have ground subsidence caused by oil exploitation. The cumulative deformation in Shuguang Oil Production Plant reaches -330 mm within two years; the maximum vertical deformation and horizontal displacement of the settling funnel reach -150 mm and 55 mm respectively; and the ratio of deformations is about $3:1$. Okada rectangular dislocation model is used to reverse the reservoir depth in Shuguang Oil Production Plant and the reservoir depth is $1\ 642.22$ m, which is close to the actual reservoir depth, showing that Okada rectangular dislocation model is suitable for reservoir parameter inversion in this area. Furthermore, there is no obvious correlation between oil and gas exploitation and surrounding seismic events. The proposed method can monitor the surface deformation characteristics of Liaohe Oilfield Area comprehensively and thus can provide reference for oil and gas production and settlement disaster prevention in this area.

Key words: Liaohe Oilfield Area; land subsidence monitoring; inversion of reservoir parameters; two-dimensional deformation decomposition; Okada rectangular dislocation model

收稿日期:2024-03-07

基金项目:国家自然科学基金项目(42174032);陕西省科技创新团队项目(2021TD-51);陕西省地学大数据与地质灾害防治创新团队项目(2022);国家重点研发计划项目(2021YFC3000404);中央高校基本科研业务费项目(CHD30102262206)

作者简介:王子倩(2001—),女,陕西西安人,硕士研究生,主要从事 InSAR 技术在地质灾害方面的应用研究。

杨成生(1982—),男,河南新乡人,教授,博士,主要从事 InSAR 技术理论及高精度地质灾害调查与监测研究,本文通信作者。E-mail:yangchengsheng@chd.edu.cn

地面沉降是一种由人类活动或自然因素导致的地表高程缓慢下降现象。近年来,随着地下资源(如地下水、石油、煤矿等)的不断开采,地面沉降对人类生活的影响日益严重。辽河油田作为我国最大的稠油、高凝油生产基地,曾多年保持年均高于一千万吨的原油产量,且呈扩大趋势。由于辽河油田区石油开采量大、油井分布密集,造成该区域出现大规模、大梯度的地面沉降现象^[1],给芦苇种植、水产品养殖和灌溉设施带来严重危害,并严重破坏周围的湿地生态环境,加剧了沿海地区的洪涝以及风暴潮等灾害^[2]。

早期针对辽河油田区的形变监测方法主要有地形图对比法和精密水准观测法^[2],但需要耗费大量的人力物力。合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术凭借其全天时、全天候的对地观测能力,可高效率、高精度、低成本地获取大范围地表形变信息,在地面沉降监测中得到广泛应用。2014年,孙赫等^[3]首次采用永久散射体干涉测量技术(permanent scatterers interferometric synthetic aperture radar, PS-InSAR)获取了辽宁省盘锦地区 2007—2011 年的地表形变信息,结果显示盘锦市地面沉降现象主要出现在城镇、石油开采区域及沿海地区。2018年,张静等^[1]研究表明盘锦地区地面沉降与地下水开采、油气资源开采、新构造运动等因素有关。此后杨崇等^[4-5]、李春进等^[6]、王远坚等^[7]、龚志强等^[8]、于冰等^[9]分别采用时序 InSAR 技术获取了该区不同时间段的地表形变特征,并利用地球物理模型研究了曙光采油厂区域的地面沉降与储层参数的关系。但目前针对该区域的监测结果多为 2020 年之前的,且多为一维视线(line of sight, LOS)向形变监测。由于辽河油田的石油开采工作仍在进行,对其近期地表形变特征及变形趋势对区域减灾控灾的影响研究尤为重要。

本研究利用 2019 年 12 月—2021 年 12 月覆盖辽河油田区的 Sentinel-1 合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像,通过差分干涉测量短基线集时序分析技术(small baseline subset INSAR, SBAS-INSAR)以及多维小基线集-二维技术(multidimensional small baseline subset two-dimensional, MSBAS-2D)对该区地表形变特征进行监测,并利用 Okada 矩形位错模型反演典型油田开采区储层参数,为辽河油田油气生产规划及沉降灾害防治提供依据。

1 研究区概况

研究区位于辽河盆地南端,紧临渤海,覆盖了辽宁省盘锦市以及锦州市部分区域(图 1 黄色框)。区内地

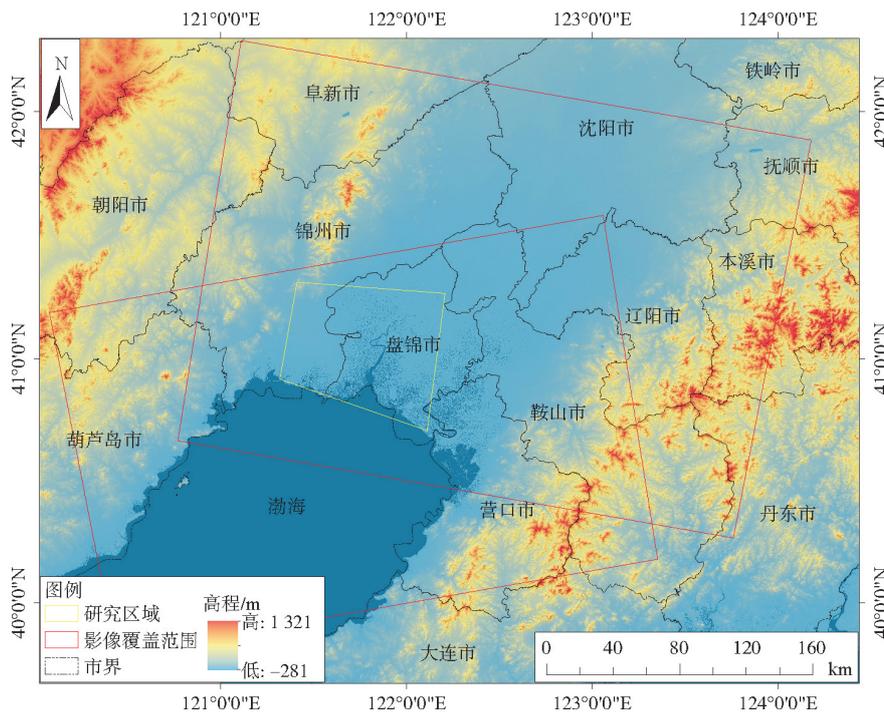


图 1 研究区影像覆盖及位置概况图

Fig. 1 Overview map of image coverage and location in the study area

势平坦、水系分支多、流域面积广、水资源丰富,拥有我国最大的芦苇滨海湿地^[10]。此外,区内石油、天然气等矿产资源丰富,形成了以石油化工为主的工业体系,曙光采油厂和欢喜岭采油厂是区内两个亿吨级油田开采单位。石油开采已造成厂区内出现不同程度的地面沉降,并导致周边部分房屋、围墙出现墙裂缝,提水泵站报废等问题^[1]。

2 数据及处理方法

2.1 数据来源

本研究采用欧洲航天局(European space agency,ESA) C波段的 Sentinel-1A/B 卫星影像,数据下载地址为 <https://search.asf.alaska.edu/#/>。影像数据包括覆盖辽河油田区的 2019 年 12 月 21 日—2021 年 12 月 22 日的 57 景升轨数据和 2019 年 12 月 20 日—2021 年 12 月 21 日的 45 景降轨数据,影像覆盖区域如图 1 所示,影像数据的具体参数见表 1。

表 1 升、降轨影像数据参数表
Table 1 Parameters of ascending and descending images

轨道	升轨	降轨	轨道	升轨	降轨
传感器	Sentinel-1A	Sentinel-1B	入射角/(°)	39.1	39.3
轨道编号	98	3	极化方式	VV+VH	VV+VH
框幅编号	129	455	成像模式	IW 宽幅模式	IW 宽幅模式
波段	C	C	影像数量	57	45
波长/cm	5.6	5.6	时间范围	2019-12-21—2021-12-22	2019-12-20—2021-12-21
方位角/(°)	-13.5	-170.4			

本研究采用美国航空航天局(national aeronautics and space administration,NASA)发布的 30 m 分辨率航天飞机雷达地形测绘数字高程模型(shuttle radar topography mission digital elevation model, SRTM DEM)数据,消除干涉图中的地形相位,数据下载地址为 <http://dwtkns.com/srtm30m/>。精密轨道星历数据用于纠正干涉组合中的基线误差,数据下载地址为 https://s1qc.asf.alaska.edu/aux_poeorb/。

2.2 技术原理

2.2.1 SBAS-InSAR 技术

SBAS-InSAR 技术^[11]将覆盖研究区的 SAR 影像数据集根据所设置的时间、空间基线阈值,组成若干个小基线集合,针对每一个集合的地表形变时间序列分别利用最小二乘法(least squares method, LS)进行求解,再利用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)求解相干点的最终形变量。该技术可以联合多个不同的较短时间基线的小基线集合进行计算,可有效减少因时间基线过长所导致的失相干现象,并增加了地表形变监测的时间采样率,能更好地获取地表的非线性形变。但该技术仅可获取单一轨道的 LOS 向形变结果,不能客观反映地表真实形变。

2.2.2 MSBAS-2D 技术

MSBAS-2D 技术^[12]根据不同轨道雷达卫星的入射角和方位角,选取具有公共区域的影像,利用成像几何关系对 LOS 向形变进行分解,分别得到垂直向、东西向的线性形变信息。该技术有效解决了单一轨道的 SAR 影像数据只能获取一维 LOS 向形变的局限性,并提高了地表形变监测的时间采样率。但针对复杂地形区域的地表形变监测,各轨道相位解缠点密度对二维形变结果解算的影响较大。

2.2.3 Okada 模型

Okada 模型^[13]是一种均匀弹性半空间的有限矩形位错模型,已被实际应用到地震断层参数^[14]、油田储层参数^[4]的反演中。根据弹性半空间各向同性位错理论,因弹性半空间内的某一矩形几何面发生错动导致地表上某点发生位移,其位移量和错动面的错动量成正比,且比例系数与该点相对于错动面的位置、错动面的几何大小、倾角、深度以及弹性介质有关。当存在多个错动面时,地表某点的形变量即为多个错动面的错动所引起的形变矢量和。

Okada 模型具有 7 个主要参数,以点 O 为坐标原点建立空间直角坐标系,其中 d 为错动面几何深度, L 为错动面沿走向的长度, W 为错动面沿倾向的宽度, θ 为错动面与水平方向的夹角, φ 为错动面与北方向的夹角, (x_0, y_0) 为错动面的几何中心在地表的投影坐标,模型几何示意图如图 2 所示。

2.3 数据处理流程

利用 SBAS-InSAR 和 MSBAS-2D 技术获取辽河油田区 2019—2021 年形变监测结果,并利用 (geodetic Bayesian inversion software, GBIS) 对曙光采油厂区域进行储层参数反演,主要包括以下 6 个步骤,技术路线图如图 3 所示。

1) 数据预处理

基于相干性最大化原则,分别选取升、降轨数据的公共主影像,并根据研究区范围对影像数据进行裁剪。进行 DEM 与主影像配准,将 DEM 由地理坐标系转换为 SAR 坐标系,并进行主影像与其他辅影像的配准。为保证干涉图的质量,对升轨数据设置时间基线为 48 d、空间基线为 100 m,共生成 148 对干涉对。由于降轨数据较少,为保证基线图的连续性,设置时间基线为 96 d、空间基线为 100 m,共生成 213 对干涉对。

2) 干涉工作流处理

先对生成的干涉对进行主辅影像共轭相乘得到差分干涉图,利用 DEM 数据模拟的地形相位进行去地形相位处理,再利用自适应滤波减弱噪声对差分干涉图的影响。利用最小费用流 (minimum cost flow, MCF) 法对差分干涉图进行相位解缠,选取研究区内相干性系数较高的区域作为解缠点,设置相干性阈值为 0.3,去除相干性较差区域,保证解缠相位质量。去除地形残差,并利用地形与大气垂直分层相位的相关性削弱解缠相位的大气延迟误差。

3) LOS 向形变解算

基于步骤 2) 得到的滤波后差分干涉图,设置振幅离差指数阈值为 0.6,最大迭代次数为 5,通过迭代优化提取高质量的高相干点。利用高斯加权分段线性拟合法对时间序列相位进行平滑,将原始相位减去平滑后相位定义为噪声,设置标准差阈值为 1,进行噪声点剔除。利用时空三维相位解缠技术进行相位解缠,并去除 DEM 误差,进行大气滤波,剔除质量较差的干涉对,最终保留升轨 122 对干涉对、降轨 95 对干涉对。利用奇异值分解对高相干点上的解缠相位进行解算得到 LOS 向形变速率以及形变时间序列结果。

4) 二维形变分解

借助 DEM 数据与 SAR 影像坐标系的关系,将步骤 2) 得到的降轨解缠相位重采样到升轨轨道坐标,并与升轨解缠相位集统一时间基准,结合升、降轨所对应的入射角和方位角信息,构建观测方程系数矩阵,利用 Tikhonov 正则化方法约束观测方程,利用奇异值分解计算得到公共区域内东西向、垂直向形变速率以及形变时间序列结果。

5) 构造 InSAR 反演数据集

利用 ArcGIS 软件分别提取曙光采油厂区域的各像素点升、降轨累积形变量及经纬度坐标,结合升、降轨 LOS 向入射角以及卫星航向角构建 InSAR 数据集,为提高反演效率分别对升、降轨 InSAR 数据集进行四叉树降采样,同时构建方差-协方差矩阵。

6) 油田储层参数反演

根据先验信息定义先验概率密度函数,设置模型各参数初始值、搜索区间以及步长,根据模型初始值计算正演模型及其似然函数值,采用马尔科夫链蒙特卡罗 (Markov chain Monte Carlo, MCMC) 方法随机调整模型参数,并计算新的正演模型及似然函数值,若新似然函数值大于上一个似然函数值则保留该组参数,通过重复迭代所保留的模型参数计算后验概率密度函数,选取最大后验概率解作为模型参数的最优估值,取

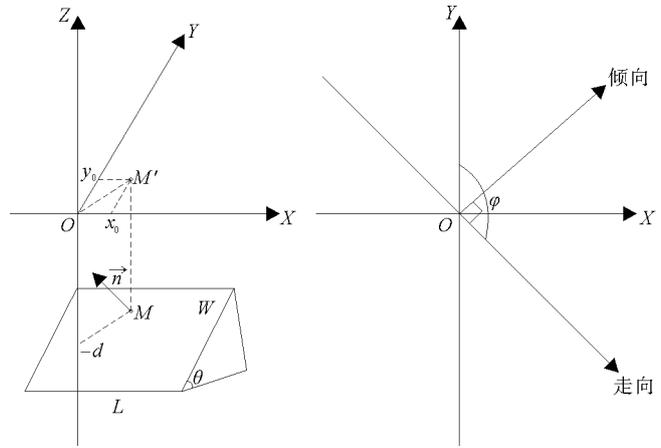


图 2 Okada 模型几何示意图

Fig. 2 Geometric diagram of Okada model

2.5%~97.5%作为模型参数的置信区间。模型反演各参数所采用的搜索区间见表2。

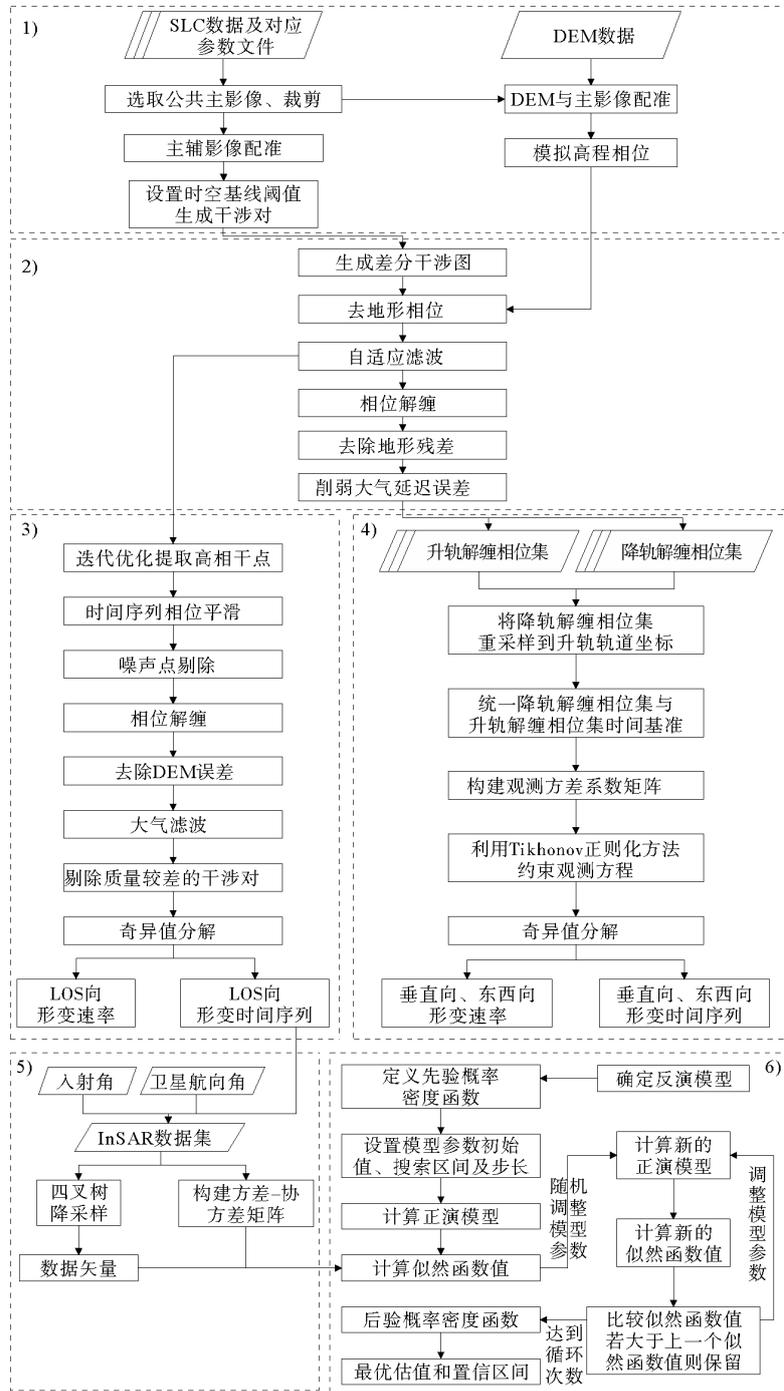


图3 技术路线图

Fig. 3 Technological route map

表2 参数反演搜索区间

Table 2 Search interval of parameter inversion

模型参数	长/m	宽/m	深/m	走向/(°)	X/m	Y/m	位错面开度/m
下限	500	500	500	120	-3 000	-2 500	-1.40
上限	3 000	4 000	3 000	150	5 000	4 000	-0.60
步长	10	10	10	10	100	100	0.05
起始值	500	500	500	130	0	0	-0.60

3 结果与分析

3.1 地表形变速率结果

利用 SBAS-InSAR 技术获取辽河油田区 2019 年 12 月—2021 年 12 月的升、降轨数据 LOS 向年均形变速率,如图 4、图 5 所示,正值表示靠近卫星视线方向,负值表示远离卫星视线方向。结果显示,升、降轨的形变特征及形变量级均表明,研究区存在 3 处沉降和 1 处抬升。3 处沉降分别位于曙光采油厂、欢喜岭采油厂

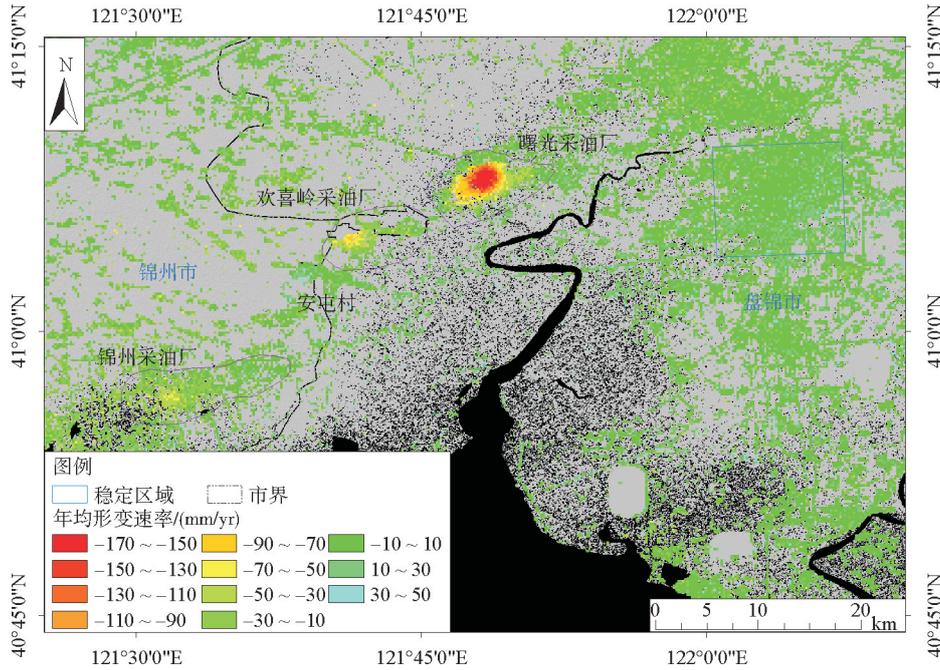


图 4 辽河油田区 Sentinel-1 升轨数据 LOS 向年均形变速率图

Fig. 4 Annual average deformation velocity in LOS from Sentinel-1 ascending track over Liaohu Oilfield Area

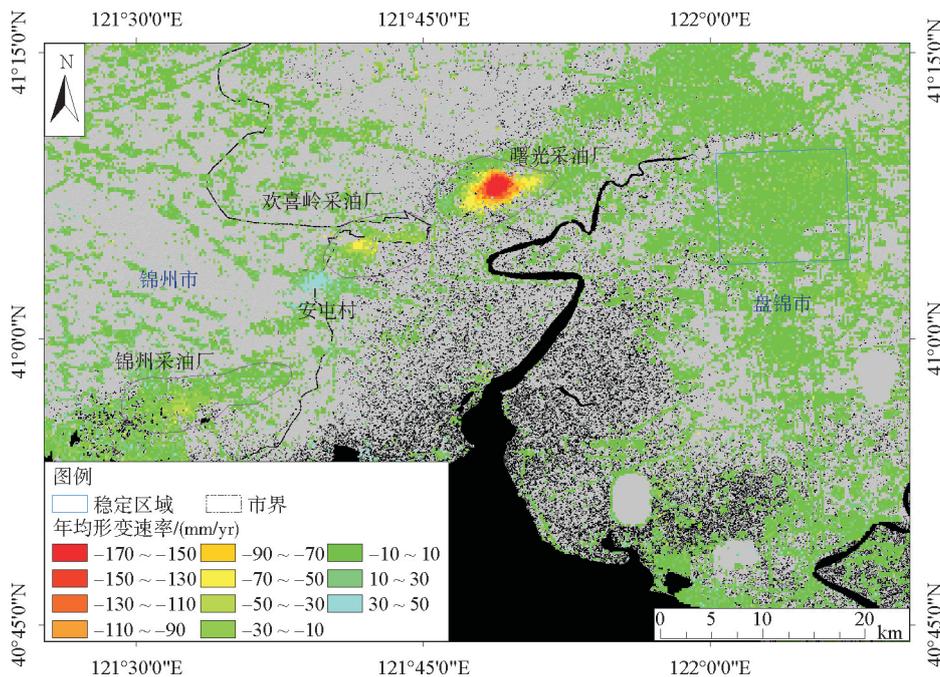


图 5 辽河油田区 Sentinel-1 降轨数据 LOS 向年均形变速率图

Fig. 5 Annual average deformation velocity in LOS from Sentinel-1 descending track over Liaohu Oilfield Area

以及锦州采油厂,而抬升区域位于安屯村周边。曙光采油厂的升、降轨 LOS 向形变速率分别为 -165、-166 mm/yr,欢喜岭采油厂的升、降轨 LOS 向形变速率分别为 -84、-75 mm/yr,锦州采油厂的升、降轨 LOS 向形变速率分别为 -64、-56 mm/yr,安屯村的升、降轨 LOS 向抬升速率分别为 39、38 mm/yr。

3.2 精度分析

为评价 InSAR 形变监测结果的可靠性,本研究分别采用相同时间段的升、降轨监测结果进行内符合精度评定。选取研究区内稳定区域(图 4 蓝色矩形框),通过双线性插值提取该区域内同名点的升、降轨的形变速率值。由于石油开采导致的地面沉降以垂直向形变为主,尽管沉降漏斗中心附近较小范围内存在水平位移,但因量级较小、范围有限,对精度评定影响较小,通过 MATLAB 软件将 LOS 向形变速率转换为垂直向(式(1))^[5],剔除无效值后得到升、降轨垂直向形变速率差值统计结果(图 6)。差值分布服从正态分布,均值为 -0.19 mm/yr,标准差为 3.63 mm/yr,内符合精度较好。由于研究区易受植被覆盖及大气水汽的影响,因此本研究获取的 InSAR 形变监测结果精度符合研究区实际情况,满足研究需求。

$$v_{\text{vertical}} = \frac{v_{\text{los}}}{\cos \theta} \quad (1)$$

式中: v_{vertical} 为投影至垂直向的形变速率, mm/yr; v_{los} 为 LOS 向的形变速率, mm/yr; θ 为雷达波束入射角, rad。

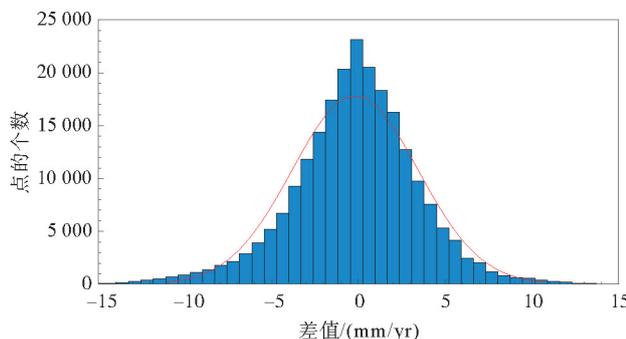


图 6 升、降轨垂直向形变速率差值统计直方图

Fig. 6 Histogram of the difference in vertical deformation rate between ascending and descending tracks

4 典型形变区参数反演

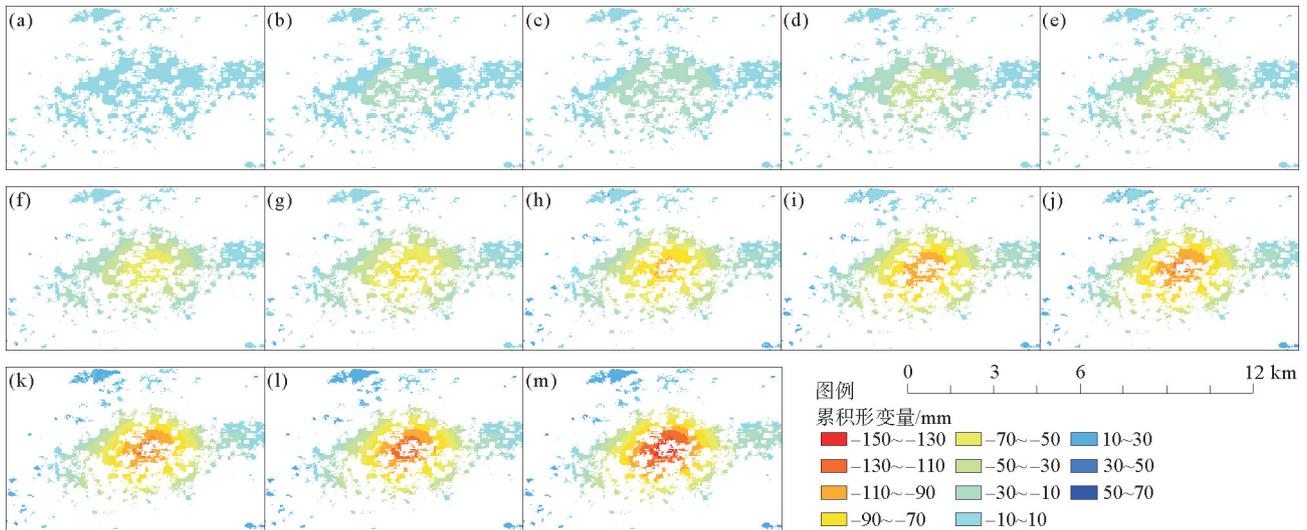
4.1 曙光采油厂二维形变时序分析

本研究选取曙光采油厂区域进行二维形变时序分析。如图 7、图 8 分别为该区域 2020 年 1 月—2021 年 12 月垂直向(正值表示抬升、负值表示沉降)和东西向(正值表示向东运动、负值表示向西运动)的形变时间序列结果。如图 7 所示,曙光采油厂区域地表累积沉降量在监测时段内持续增加,沉降中心位于油田中心,累积形变量达 -150 mm。由于土体在产生垂直向下位移时,会在一定范围内对周围土体产生侧向拉力,使得周围土体向中心移动,因此油田中心东西两侧区域向中心移动,东、西向最大位移量分别为 45、55 mm,量级基本一致。由图 7 和图 8 可知,垂直向与东西向累积形变量之比约为 3 : 1。

4.2 模拟结果与分析

本研究以曙光采油厂为例,以升、降轨 LOS 向累积沉降量为观测量,选取 Okada 模型开展油层参数反演研究。Okada 模型包含 7 个参数,且具有较高的自由度,能够获取油田储层的更多信息。在模型反演时需对形变结果建立独立的坐标系,设置参考基准点坐标为 121.78°E、41.14°N,研究区坐标为经度 121.74°E~121.85°E,纬度 41.09°N~41.17°N。联合升、降轨形变监测结果,利用 Okada 模型反演得到的最优拟合参数和 2.5%~97.5%的置信区间见表 3。

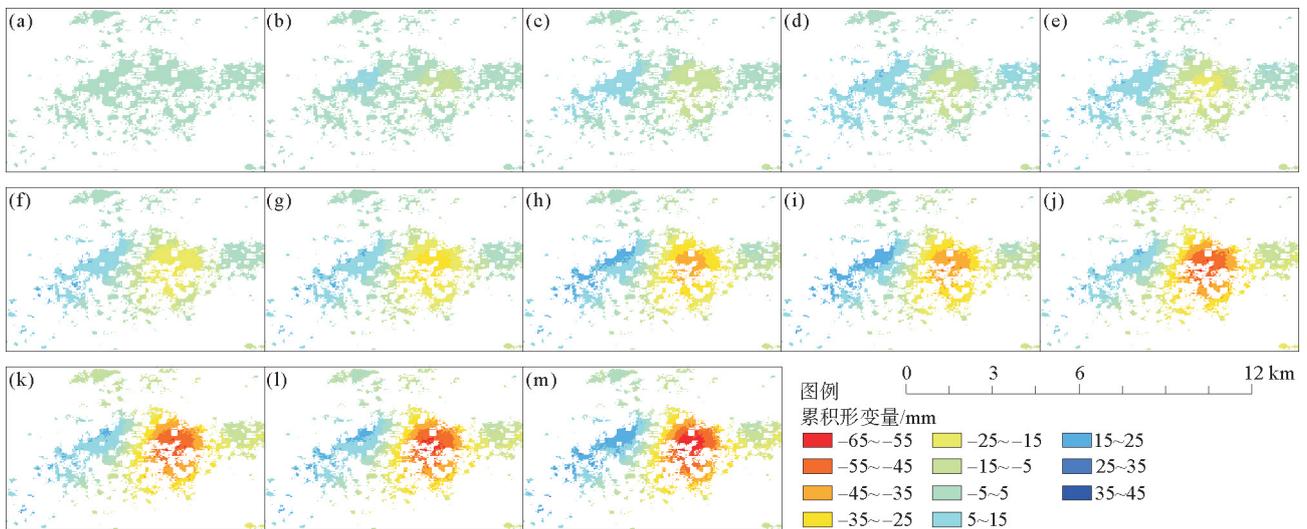
由表 3 可知,Okada 模型反演得到的油层中心投影到地表的坐标(-1 140.10 m, -1 756.93 m),油层长 1 611.82 m,宽 2 791.15 m,油层中心深度 1 642.22 m,与沈阳地质矿产研究公布的油层深度(1.6 km)一致^[9],油层走向 135.815°,位错面开度 -0.962 m,说明油层因石油开采而造成岩层收缩。图 9(a)、图 10(a)分别为升、降轨 InSAR 形变结果,图 9(b)、图 10(b)分别为 Okada 模型反演的升、降轨最优拟合形变,图 9(c)、图 10(c)分别为实际形变与拟合形变模型的差值。从最佳拟合形变模型(图 9(b)、图 10(b))可以看出,研究区地表形变呈椭圆形,与实际形变结果基本一致。从残差值图(图 9(c)、图 10(c))可以看出,形变区域的残差较小,说明 Okada 模型适用于曙光采油厂区域的储层参数反演。



(a)2020-01-01;(b)2020-02-19;(c)2020-04-19;(d)2020-06-30;(e)2020-08-28;(f)2020-10-27;(g)2020-12-27;
(h)2021-02-25;(i)2021-04-26;(j)2021-06-25;(k)2021-08-24;(l)2021-10-23;(m)2021-12-21

图 7 曙光采油厂区域垂直向形变时间序列

Fig. 7 Time series of vertical deformation in Shuguang Oil Production Plant Area



(a)2020-01-01;(b)2020-02-19;(c)2020-04-19;(d)2020-06-30;(e)2020-08-28;(f)2020-10-27;(g)2020-12-27;
(h)2021-02-25;(i)2021-04-26;(j)2021-06-25;(k)2021-08-24;(l)2021-10-23;(m)2021-12-21

图 8 曙光采油厂区域东西向形变时间序列

Fig. 8 Time series of east-west deformation in Shuguang Oil Production Plant Area

表 3 Okada 模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters of the Okada model

模型参数	长/m	宽/m	深/m	走向/(°)	X/m	Y/m	位错面开度/m
最优估值	1 611.82	2 791.15	1 642.22	136.091	-1 140.10	-1 756.93	-0.972
置信下限	1 511.74	2 736.23	1 597.71	134.871	-1 168.50	-1 784.43	-1.063
置信上限	1 700.41	2 834.85	1 691.61	137.220	-1 106.00	-1 721.34	-0.901

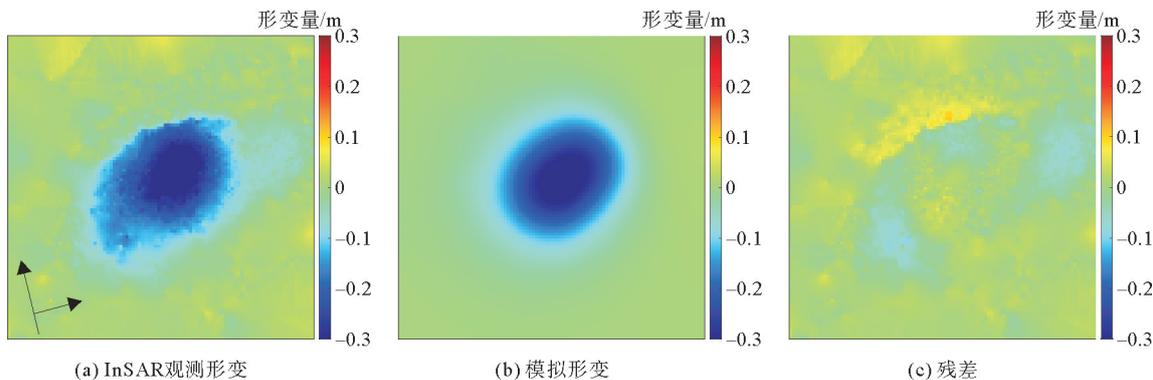


图 9 曙光采油厂区域升轨 Okada 模型反演结果

Fig. 9 Inversion results of the Okada model from ascending track in Shuguang Oil Production Plant Area

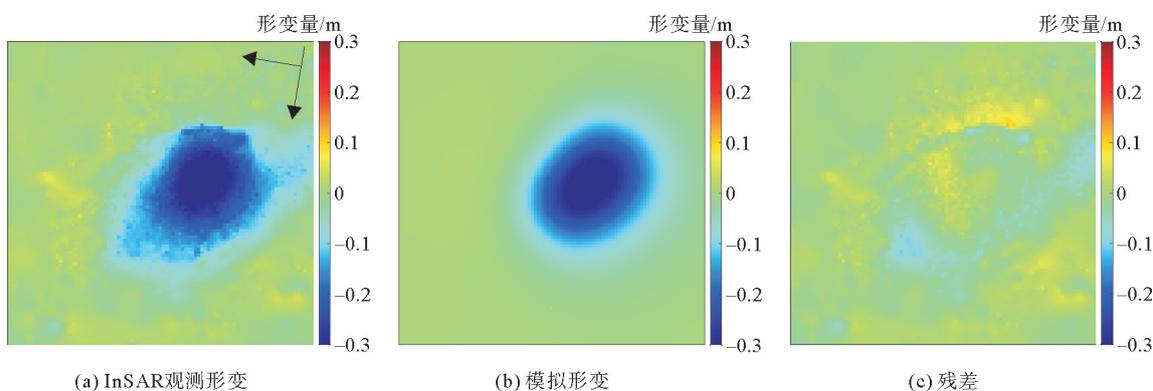


图 10 曙光采油厂区域降轨 Okada 模型反演结果

Fig. 10 Inversion results of the Okada model from descending track in Shuguang Oil Production Plant Area

5 讨论

5.1 油气开采对形变的影响

辽河油田区地面沉降多为石油开采所致,研究区的 4 处形变区分别对应曙光采油厂、欢喜岭采油厂、安屯村周边以及锦州采油厂,在 4 个区域内分别选取特征点 P1、P2、P3、P4,提取其形变时间序列,如图 11 所示。

①特征点 P1 位于曙光采油厂沉降中心,其时间序列(图 11(a))呈持续线性沉降,为研究区形变量最大区域,两年累积形变量达 -330 mm,省道 S308 穿越沉降漏斗区,地面沉降会影响到省道 S308 的正常运营,应得到相关部门的重视。②特征点 P2 位于欢喜岭采油厂沉降中心,其时间序列(图 11(b))呈持续沉降趋势,且具有季节性变化特征,每年 7 月有一定幅度的抬升,12 月开始缓慢沉降,到次年 3 月沉降速度加快。原因可能与欢喜岭采油厂的天然气供给有关,夏季天然气使用量少、开采量下降使地表有一定回升,冬季天然气需求量增大,开采量增加导致沉降增加。P2 点两年累积形变量达 -132 mm。③特征点 P3 位于安屯村周边区域,其时间序列(图 11(c))呈抬升趋势,并具有季节性变化特征,每年 7 月开始抬升,至次年 3 月开始沉降,原因可能与辽河储气库有关,夏季天然气使用量较少时储存天然气,导致地表抬升,冬季天然气使用量增大时抽取天然气,导致地面沉降。P3 点总体呈抬升趋势,两年累积形变量达 54 mm。④特征点 P4 位于锦州采油厂沉降中心,其时间序列(图 11(d))呈持续线性沉降,两年累积形变量达 -92 mm,结合该区土地利用情况^[15],原因可能与渔业养殖有关。上述监测结果与龚志强等^[8]2017—2020 年监测结果的形变趋势基本一致,表明该区开采形变具有稳定、持续的形变特征。由于 SAR 影像侧视成像的原因,得到的升、降轨 LOS 向形变数据存在一定差异。

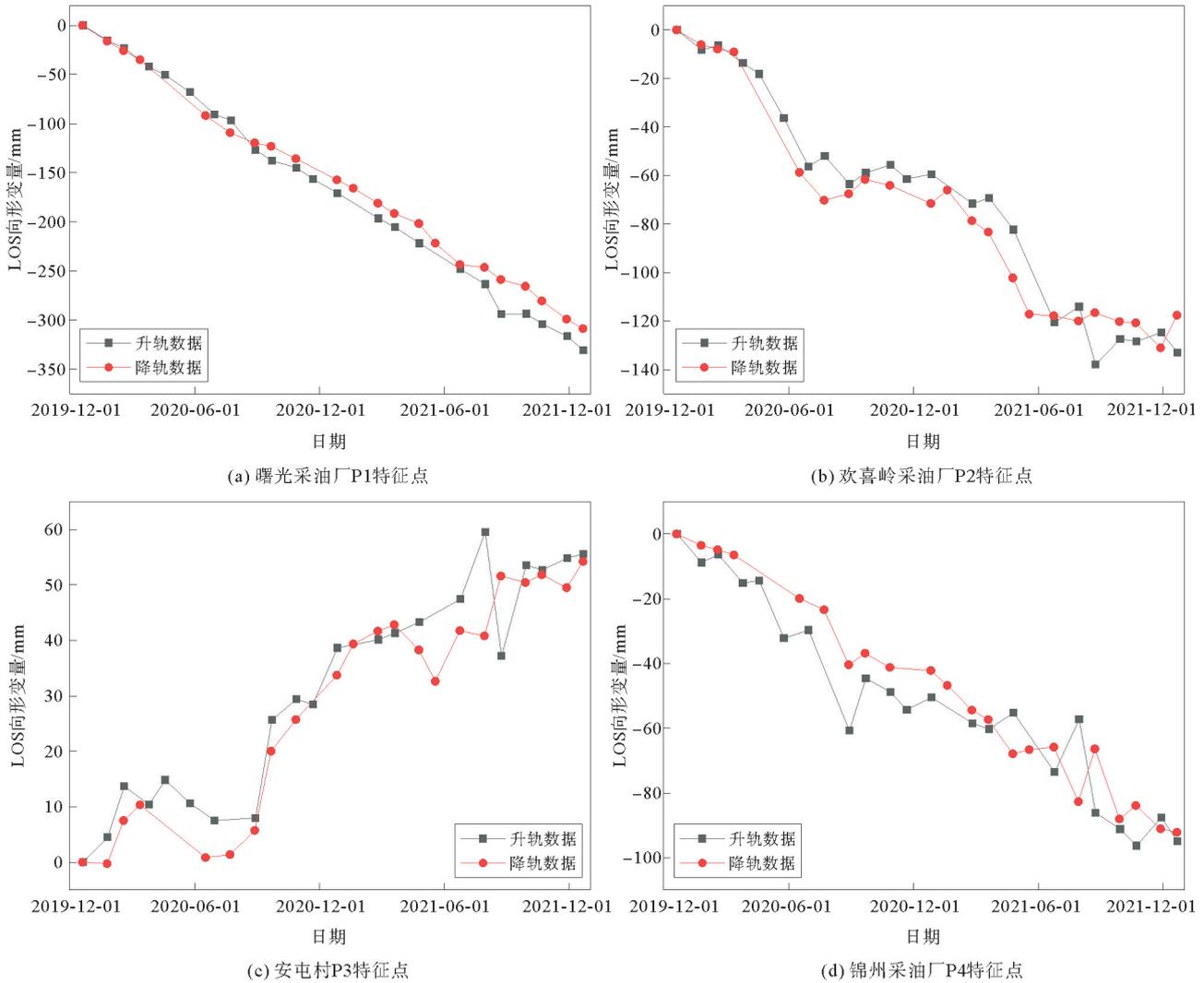


图 11 P1~P4 特征点升降轨形变时间序列

Fig. 11 Ascending and descending tracks deformation time series results of P1-P4 points

5.2 地表形变与地震

在石油开采过程中,石油的采出以及液体、蒸汽的注入均会造成区域应力的改变。向油田储层中注入蒸汽使储层孔隙压力增大,岩层有效应力减小,新的应力比蒸汽注入前更加接近破裂包络线,从而诱发地震^[16]。为讨论研究区石油开采与地震发生的相关性,从中国地震局中心网站(<http://data.earthquake.cn>)获取辽宁省 2009—2022 年的地震信息(图 12),其中圆的大小表示地震震级,黑色虚线代表油田储层深度上限 900 m,蓝色虚线代表油田储层下限 3 700 m,红色虚线代表采用 Okada 模型反演得到的油田储层深度。从图 12 中可以看出,该区域 2009—2022 年发生地震的震源深度均不在油田储层范围内。因此,虽然该区因石油开采造成地表发生严重形变,但与地震的发生不具有明显的相关性。

6 结论

本研究利用 SBAS-InSAR 和 MSBAS-2D 技术对覆盖辽河油田区的 Sentinel-1 数据进行处理,获取研究区地表形变速率和形变时间序列,并基于监测结果进行曙光采油厂区域的储层参数反演,结果表明:

1) 曙光采油厂、欢喜岭采油厂和锦州采油厂均存在因石油开采导致的地面沉降,其中曙光采油厂 LOS 向形变量最大,两年累积形变量达 -330 mm,其沉降漏斗最大垂直形变和水平位移分别达 -150、55 mm,

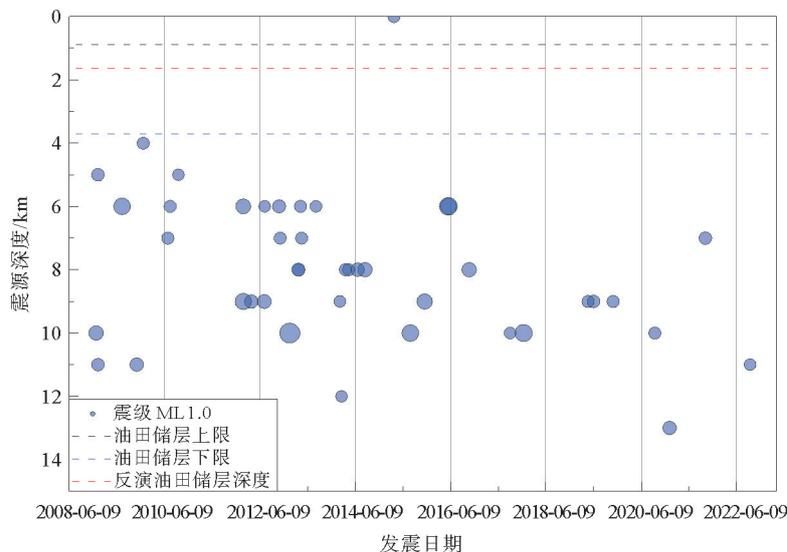


图 12 辽宁省 2009—2022 年地震震源深度分布图

Fig. 12 Distribution map of earthquake source depths in Liaoning Province from 2009 to 2022

形变量之比约 3 : 1。

2) MSBAS-2D 技术能够较好地获取研究区垂直向和东西向二维形变特征,与 SBAS-InSAR 技术相结合,可全面地反映研究区地表形变情况。

3) 利用 Okada 矩形位错模型反演得到曙光采油厂的油层深度为 1 642.22 m,与实际的油层深度接近,InSAR 观测形变与最优估值参数正演得到的形变结果的残差较小,说明该反演方法适用于曙光采油厂的储层参数反演,反演得到的位错面开度-0.972 m,说明因石油开采造成了岩层收缩。

4) 结合辽河油田周边的地震记录,认为石油开采活动与周边地震无明显相关性。

本研究利用时序 InSAR 技术获取辽河油田区近期地表形变特征,并结合 Okada 模型反演油田储层参数信息,可为研究区石油开采合理规划提供参考。建立 InSAR 监测结果与实际油田开采量、注水量之间的关系,并利用时间序列结果进行形变趋势预测将是下一步的研究重点。

参考文献:

- [1] 张静,冯东向,蔡巍,等.基于 SBAS-InSAR 技术的盘锦地区地面沉降监测[J].工程地质学报,2018,26(4):999-1007.
ZHANG Jing,FENG Dongxiang,QI Wei,et al. Monitoring land subsidence in Panjin region with SBAS-InSAR method[J]. Journal of Engineering Geology,2018,26(4):999-1007.
- [2] 孙岐发,田辉,张勤,等.盘锦湿地地面沉降历史过程研究[J].湿地科学,2016,14(5):607-610.
SUN Qifa,TIAN Hui,ZHANG Qin,et al. Study on historical process of the land subsidence in Panjin wetlands[J]. Wetland Science,2016,14(5):607-610.
- [3] 孙赫,张勤,杨成生,等. PS-InSAR 技术监测分析辽宁盘锦地区地面沉降[J].上海国土资源,2014,35(4):68-71.
SUN He,ZHANG Qin,YANG Chengsheng,et al. PS-InSAR monitoring of land subsidence in the Panjin region of Liaoning Province[J]. Shanghai Land & Resources,2014,35(4):68-71.
- [4] 杨崇,刘国祥,于冰,等.基于 InSAR 形变的辽河油田曙光采油厂储层参数反演[J].国土资源遥感,2020,32(1):209-215.
YANG Chong,LIU Guoxiang,YU Bing,et al. Inversion of reservoir parameters in Shuguang Oil Production Plant of the Liaohe Oilfield based on InSAR deformation[J]. Remote Sensing for Land & Resources,2020,32(1):209-215.
- [5] 杨崇.辽河油田地表沉降 InSAR 监测及储层参数反演[D].成都:西南交通大学,2019.
YANG Chong. Surface subsidence InSAR monitoring and reservoir parameter inversion in Liaohe Oilfield[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2019.
- [6] 李春进,杨崇,七珂珂,等.利用地表沉降信息反演油田储层参数[J].测绘地理信息,2022,47(3):56-60.

- LI Chunjin, YANG Chong, QI Keke, et al. Inversion of oilfield's reservoir parameters by surface subsidence information [J]. *Journal of Geomatics*, 2022, 47(3): 56-60.
- [7] 王远坚, 姜岳, MISA R, 等. 基于 PS-InSAR 监测的石油开采地表下沉模型反演[J]. *中国矿业*, 2021, 30(4): 82-88.
WANG Yuanjian, JIANG Yue, MISA R, et al. Surface subsidence inversion model with PS-InSAR monitoring in petroleum exploitation[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(4): 82-88.
- [8] 龚志强, 唐伟, 蒋金豹, 等. 基于时序 InSAR 技术的辽河三角洲油田地面沉降监测与建模[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(8): 1422-1433.
GONG Zhiqiang, TANG Wei, JIANG Jinbao, et al. Monitoring and modeling of land subsidence in Liaohe Delta Oilfield-based on time series InSAR technology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(8): 1422-1433.
- [9] 于冰, 牛童, 蔡锐, 等. 基于时序 InSAR 的辽河油田地表形变监测及储层参数多模型反演[J]. *大地测量与地球动力学*, 2024, 44(9): 937-944.
YU Bing, NIU Tong, CAI Rui, et al. Surface deformation monitoring and multi-model inversion of reservoir parameters in Liaohe Oilfield based on time-series InSAR[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2024, 44(9): 937-944.
- [10] 高翔, 袁希平, 甘淑. 辽河河口湿地动态变化监测与分析[J]. *国土与自然资源研究*, 2023(2): 26-30.
GAO Xiang, YUAN Xiping, GAN Shu. Monitoring and analysis of the dynamic change of the wetland in the Liaohe Estuary[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2023(2): 26-30.
- [11] 董继红, 张肃, 梁京涛, 等. 利用 Stacking/SBAS 技术在滇西北地区滑坡隐患的识别对比[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(4): 21-31.
DONG Jihong, ZHANG Su, LIANG Jingtiao, et al. Comparison of landslide hazard identification in Northwest Yunnan using Stacking/SBAS technology[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2023, 42(4): 21-31.
- [12] 熊国华, 杨成生, 朱赛楠, 等. 基于 MSBAS 技术的金沙江上游色拉滑坡形变分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(5): 1-9.
XIONG Guohua, YANG Chengsheng, ZHU Sainan, et al. Deformation analysis of Sela landslide in the upper reaches of Jinsha River based on MSBAS technology[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 1-9.
- [13] 王乐洋, 许冉冉, 靳锡波, 等. 非线性反演算法的综合评价对比[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(3): 341-351.
WANG Leyang, XU Ranran, JIN Xibo, et al. Comprehensive evaluation and comparison of nonlinear inversion algorithms [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(3): 341-351.
- [14] 王乐洋, 李志强. 震源参数反演及精度评定的 Bootstrap 方法[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(6): 2001-2016.
WANG Leyang, LI Zhiqiang. Bootstrap method for inversion and precision estimation of earthquake source parameters[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(6): 2001-2016.
- [15] 智烈慧, 李心, 马田田, 等. 辽河三角洲土地利用变化轨迹、驱动过程及生态系统服务时空演变[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(1): 141-150.
ZHI Liehui, LI Xin, MA Tiantian, et al. The spatiotemporal evolution of land use trajectories, drivers and the ecosystem services in Liao River Delta in the past four decades[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(1): 141-150.
- [16] 张东晓. 时序 InSAR 技术在油气田形变监测中的应用[D]. 西安: 长安大学, 2020.
ZHANG Dongxiao. Deformation monitoring using time series InSAR technology over oilfield[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.

(责任编辑:高丽华)