



引文格式: 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. DOI: 10.13203/j.whugis20220162

Citation: GONG Zhiqiang, TANG Wei, JIANG Jinbao, et al. Monitoring and Modeling of Land Subsidence in Liaohe Oilfield Based on Time Series InSAR Technology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(8): 1422-1433. DOI: 10.13203/j.whugis20220162

# 基于时序InSAR技术的辽河三角洲油田地面沉降监测与建模

龚志强<sup>1</sup> 唐伟<sup>1</sup> 蒋金豹<sup>1</sup> 李辉<sup>2</sup> 张鑫<sup>3</sup> 耿旭<sup>1</sup> 卫星<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京, 100083

<sup>2</sup> 辽宁省化工地质勘查院有限责任公司, 辽宁 锦州, 121007

<sup>3</sup> 沈阳市勘察测绘研究院有限公司, 辽宁 沈阳, 110004

**摘要:** 辽河三角洲油田的持续性开采导致严重地表沉降, 影响石油采收率和油田生产作业, 对地表基础设施乃至生态环境也构成威胁。为保证该区域石油等地下流体资源的安全开采和区域生态环境保护, 通过将相干性信息作为权重融入小基线集成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术中, 获取辽河三角洲地区2017—2020年地表形变信息。采用升降轨数据融合分解方法, 提取曙光油田区域的垂直及水平东西向形变, 并对曙光采油厂储层压实引起的地面沉降进行储层压实与沉降模型反演。结果显示:(1)辽河三角洲区域内存在多处地面沉降, 曙光采油厂和欢喜岭采油厂沉降最为明显, 视线向平均沉降速率分别达到158 mm/a和73 mm/a;(2)曙光油田呈现出向油田沉降漏斗中心水平移动的规律, 且东西两侧移动速率量级基本一致, 最大水平移动速率达到-62 mm/a(朝西运动);(3)基于曙光油田储层参数构建的储层压实与沉降模型能较好地对油田沉降中心最大沉降量位置进行反演, 且沉降范围和量级与InSAR观测结果较为一致。

**关键词:** InSAR; 辽河三角洲; 地表沉降; 反演

中图分类号: P237

文献标识码: A

收稿日期: 2022-12-15

DOI: 10.13203/j.whugis20220162

文章编号: 1671-8860(2024)08-1422-12

## Monitoring and Modeling of Land Subsidence in Liaohe Delta Oilfield Based on Time Series InSAR Technology

GONG Zhiqiang<sup>1</sup> TANG Wei<sup>1</sup> JIANG Jinbao<sup>1</sup> LI Hui<sup>2</sup> ZHANG Xin<sup>3</sup>  
GENG Xu<sup>1</sup> WEI Xing<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China

<sup>2</sup> Liaoning Institute of Geological Exploration Co. Ltd, Jinzhou 121007, China

<sup>3</sup> Shenyang Geotechnical Investigation and Surveying Research Institute Co. Ltd, Shenyang 110004, China

**Abstract: Objectives:** The continuous exploitation of the Liaohe Delta oilfield has resulted in severe surface subsidence, impacting oil recovery rates, production operations, and posing threats to surface infrastructure and ecological environments. To ensure the safe exploitation of underground fluid resources and protect the regional environment, monitoring implementation is needed for this region. **Methods:** The method of small baseline subset interferometric synthetic aperture radar (SBAS-InSAR) technology with coherence information as weights was used to analyze the surface deformation. Using the fusion decomposition of synthetic aperture radar descending and ascending orbit results to extract both vertical and horizontal east-west deformation within the Shuguang oilfield area. Subsequently, a reservoir compaction-induced subsidence inversion model is applied

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金(42001368); 煤矿开采水资源保护与利用国家重点实验室开放基金(WPUKFJJ2019-17); 中央高校基本科研业务费专项资金(2021YQDC05)。

**第一作者:** 龚志强, 硕士, 研究方向为InSAR数据处理与分析应用研究。gongzhiqiang0517@163.com

**通讯作者:** 唐伟, 博士, 副教授。weitang@cumtb.edu.cn

to the Shuguang oilfield to simulate and interpret the observed subsidence phenomena, linking them to the underground fluid resource exploitation activities. **Results:** The results reveal significant ground subsidence throughout the Liaohe Delta region, particularly in the Shuguang oilfield and Huanxiling oilfield. The average line of sight subsidence rates reaching 158 mm/a and 73 mm/a, respectively. In the Shuguang oilfield, there is horizontal movement towards the subsidence center, with approximately equal magnitudes of movement on the east and west sides. The maximum horizontal movement rate is observed to be  $-62$  mm/a (westward motion). Furthermore, the reservoir compaction and subsidence model based on Shuguang oilfield reservoir parameters effectively invert the maximum subsidence position at the center of the oilfield, with subsidence range and magnitude consistent with the InSAR observation results. **Conclusions:** The study concludes that continuous exploitation of oil has led to significant ground subsidence in the Liaohe Delta region, especially in Shuguang oilfield and Huanxiling oilfield, with clear patterns of subsidence and horizontal movement detected using SBAS-InSAR technology. The developed reservoir compaction-induced subsidence inversion model proves effective in simulating subsidence phenomena associated with oilfield operations. These findings underscore the importance of monitoring and managing subsidence risks to ensure the safe exploitation of underground resources and to protect regional ecological environments in the Liaohe Delta region.

**Key words:** InSAR; Liaohe Delta; surface subsidence; inversion

石油开采是将流体不断注入和抽取的过程,这一过程会导致储层压力的变化,引起储层的压实或膨胀,反映到地表表现为沉降或隆起<sup>[1]</sup>。地表形变会对油田的安全开采造成影响,包括对油田管道、道路和建筑物等构成威胁,危及油田生产的产量和能源安全<sup>[2]</sup>,甚至增加诱发地震的可能<sup>[3]</sup>。因此,对油田分布密集的地区进行地表持续性监测,及时掌握油田动态变化,对油田生产安全、油藏建模、提高采收率和生态环境保护等尤为重要<sup>[4]</sup>。

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)作为一种新兴的卫星大地测量技术,与传统水准和地基全球定位系统(global positioning system, GPS)的稀疏点观测不同,该技术可以获取空间连续、高时空分辨率的地表形变信息,精度达到厘米级至毫米级。时序 InSAR 技术以永久散射体 InSAR (persistent scatterers InSAR, PS-InSAR) 和小基线集 InSAR (small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR) 为典型代表<sup>[5]</sup>,可以在一定程度上克服传统 InSAR 时空去相干的影响,在火山活动<sup>[6-7]</sup>、地震<sup>[8-9]</sup>、滑坡<sup>[10]</sup>、露天矿边坡稳定性<sup>[11]</sup>、煤矿开采沉陷<sup>[12]</sup>、地下水开采引发的地面沉降<sup>[13]</sup>、冰川移动<sup>[14]</sup>等领域得到广泛应用。在油田地面沉降方面,InSAR 技术不仅发挥形变监测的作用,而且其获得的高时空分辨率形变信息可用于反演油田的储层参数及开采量信息,为油田开采规划、地质灾害防治保护提供基础数据<sup>[1,3,4,15-17]</sup>。

辽河油田是中国最大的稠油和高凝油的生

产基地,已有 60 余年的勘探历史,创新采用蒸汽吞吐、蒸汽驱、蒸汽驱辅助重力泄油等多种技术。近年来,随着工业的高速发展,以及对石油资源需求量的增加,辽河油田的开采力度也随之加大。持续性过度开采导致油田发生严重的地面沉降,造成建筑物受损、地下管道破裂、井管抬升等问题,地下油井也可能因不均匀沉降导致地层侧滑而断裂<sup>[18-19]</sup>。另外,这种缓慢的长时间、区域性地面沉降还会导致辽河三角洲湿地生态环境遭到破坏,同时受全球气候变暖、海平面上升等因素叠加影响,地面下沉加剧了该区域的相对海平面上升速率,增加了沿海洪水淹没及风暴潮灾害等气候变化风险<sup>[20-21]</sup>。辽河油田自开发建设以来,遭受了 10 余次较大洪水灾害,经历了 8 次天文大潮的侵袭,给油田生产带来了重大影响,累计造成直接经济损失近 30 亿元<sup>[22]</sup>。2019 年,受台风“利奇马”带来的持续强降雨及上游水库泄洪和河水汇流影响,辽河油田大量设施被水淹没,导致 1 865 口井关停,造成产量损失<sup>[23]</sup>。而持续性的地面沉降降低了辽河下游的防洪堤高程,加剧了洪涝灾害的严重性<sup>[22-24]</sup>。因此,实时掌握该地区的地表沉降动态和分布是十分必要的。

对辽河三角洲区域地面沉降监测已有大量研究,所采用的方法包括传统的地形图对比方法<sup>[19]</sup>和水准测量技术。前者精度较低,后者虽然精度高,但是点位稀疏,且人力物力耗费巨大,无法满足区域性监测需求。近年来,也有不少研究采用了星载时序 InSAR 技术进行辽河平原地面沉降监测研究,这对揭示区域性地面沉降的演变

和成因起到了积极的作用<sup>[25-26]</sup>。还有的研究侧重于辽河三角洲内的曙光油田局部地面沉降监测,并利用相关地球物理模型对沉降进行模拟、储层参数反演和机理解释<sup>[18, 27-28]</sup>。但由于缺少多源、多角度 InSAR 观测数据,上述研究在从雷达视线向(line of sight, LOS)转为垂直向形变时,忽略了水平位移,导致垂直向精度受到限制。同时,所采用的沉降预测模型多为如 Mogi 模型、Okada 位错模型等地球物理模型,不能很好地解释由储层压力变化导致的油藏压实和地面沉降机理。

本文基于升降轨模式下 2 个轨道 2017—2020 年的 Sentinel-1 数据,利用改进 SBAS-InSAR 技术获得辽河三角洲升降轨 LOS 地表形变信息,利用 GACOS (generic atmospheric correction online service for InSAR) 产品去除大气延迟的长波部分,融合升降轨 LOS 形变提取曙光油田二维形变信息,并基于储层参数和储层压实与地面沉降模型对曙光油田沉降进行了建模分析,揭示储层压力变化与地表沉降的关系。

## 1 研究区及数据处理

### 1.1 研究区概况

辽河油田所在区域位于中国辽宁省中部的辽河盆地,盆地具有多旋回、多层系和多油气藏

类型特色,是一个复式叠加型沉积盆地,属暖温带大陆性半湿润、半干旱季风气候区。盆地按照构造格局细分为东部拗陷、北部大民屯拗陷和西部拗陷,自下而上共含有新太古界、中-新元古界、古生界、中生界和新生界 5 套地层<sup>[29]</sup>。研究区在大地构造上属于华北台地的东北部,在区域构造上位于辽河断陷地带。在土地利用类型上主要为耕地和湿地,且沿海区域湿地覆盖大,拥有重要的自然保护区和大量芦苇沼泽。1975—1978 年,曙光和欢喜岭两个亿吨级油田先后被发现,其位于辽宁省盘锦市辽河下游绕阳河畔。曙光油田位于辽河盆地西部凹陷西斜坡中段,是辽河油田的重要采油厂,探明含油面积达 164.7 km<sup>2</sup>,地质储量 4.1 亿吨,油层埋深在 900~3 700 m,稠油区块总日产液(原油+水)达到 13 884 t,其中原油日产 3 507 t<sup>[30]</sup>,欢喜岭油田位于辽河拗陷西部凹陷西斜坡南部,该油田储层埋藏跨度大、含油层多、非均匀性强、油种多样,油区面积达到 350 km<sup>2</sup>,经过多年勘探,欢喜岭油田目前整体储量规模达 5×10<sup>8</sup> t,区块总日产液(原油+水)达到 11 601 t,日产原油为 1 487 t,较曙光油田原油产量少,开采深度达到 600~3 900 m<sup>[31]</sup>。随着采油量的不断增加,油田导致的地表形变愈加严重。辽河三角洲湿地保护区常年受到地表沉降的影响,湿地资源大幅度减少<sup>[32]</sup>。研究区与雷达影像覆盖范围如图 1 所示。

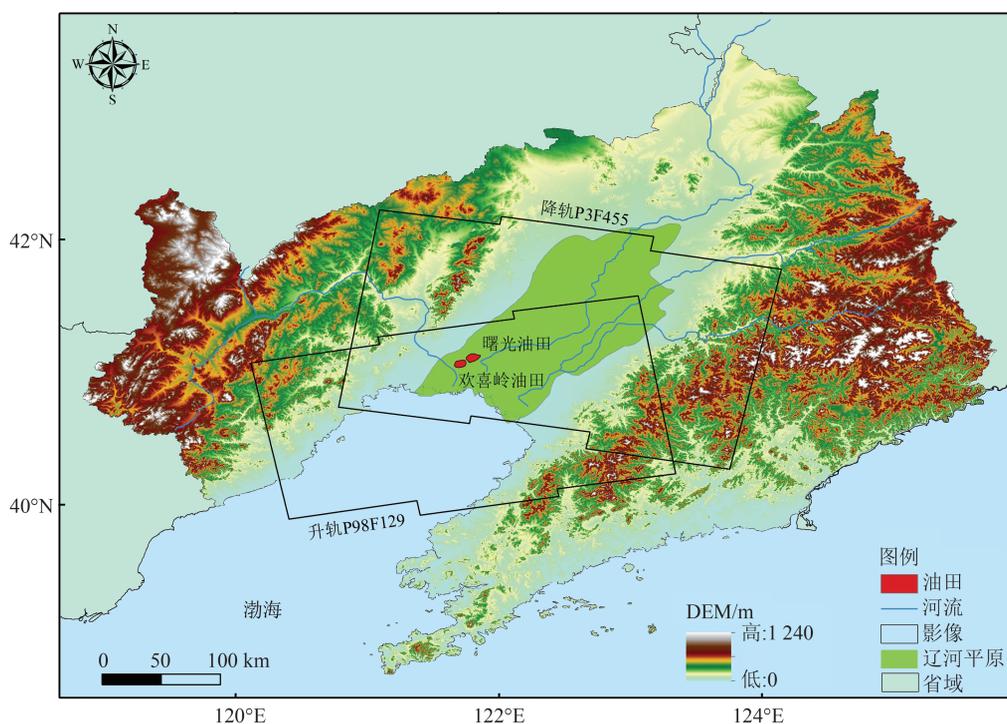


图1 研究区与雷达影像覆盖范围

Fig. 1 The Study Area and Coverage of SAR Image

## 1.2 SAR数据集与干涉处理

本文所采用的 SAR 数据集为 Sentinel-1 的升轨和降轨影像数据,数据覆盖范围见图 1。Sentinel-1 卫星是由欧洲空间局发射运营的两颗对地观测卫星 (Sentinel-1A/B) 组成,搭载 C 波段(波

长 5.6 cm) 的 SAR,单视复数影像数据分辨率为  $5\text{ m} \times 20\text{ m}$  (距离向  $\times$  方位向),具备 12 d 的短重访周期<sup>[33]</sup>。宽幅模式下的影像覆盖范围达到 250 km,非常有利于大范围监测。影像基本信息如表 1 所示。

表 1 Sentinel-1 影像数据信息

Tab. 1 Sentinel-1 Data Information

传感器	轨道	波段	Path	Frame	时间范围	影像数量/期	干涉图数量/幅
Sentinel-1	升轨	C(5.6 cm)	98	129	2017-03-30—2020-10-04	104	327
	降轨		3	455	2016-12-11—2020-10-03	91	268

本文利用 GMTSAR (generic mapping tools SAR) 软件对上述 SAR 数据进行干涉处理<sup>[34]</sup>。在干涉对组合选取中,设置垂直基线阈值为 150 m,时间基线阈值为 50 d,升轨数据共生成了 327 幅干涉图,降轨数据生成了 268 幅干涉图(表 1)。在干涉处理过程中,采用 30 m 分辨率的航天飞机雷达地形任务数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 数据去除地形相位<sup>[35]</sup>。为了抑制干涉相位误差,先对干涉图进行了距离向和方位向  $8 \times 2$  的多视平均,再利用 Goldstein 滤波方法对干涉图进行相位滤波,最后采用 SNAP 软件对每一幅干涉图进行二维相位解缠。

由于研究区南临辽东湾,水汽含量丰富,且

时空变化较快,因此对流层延迟影响较为严重。本文采用 GACOS 减弱对流层延迟误差<sup>[36]</sup>。图 2 展示了升降轨干涉图经 GACOS 大气校正前后的效果。由于研究区地形平坦,与地形变化相关的大气延迟不明显,该区域面临的主要问题是空间尺度上的大气长波延迟分量和时间上不相关的短波延迟(湍流混合效应)。从图 2 可以看出,在临近渤海黑色框区域的大气延迟得到了明显减弱,证明 GACOS 对于空间上尺度较大的大气具有较好的校正效果。残余的大气误差在空间上尺度较小、时间上不相关,更符合随机噪声的分布规律,在后续的时间序列分析上采用时空滤波方法进行估计和去除<sup>[37-38]</sup>。

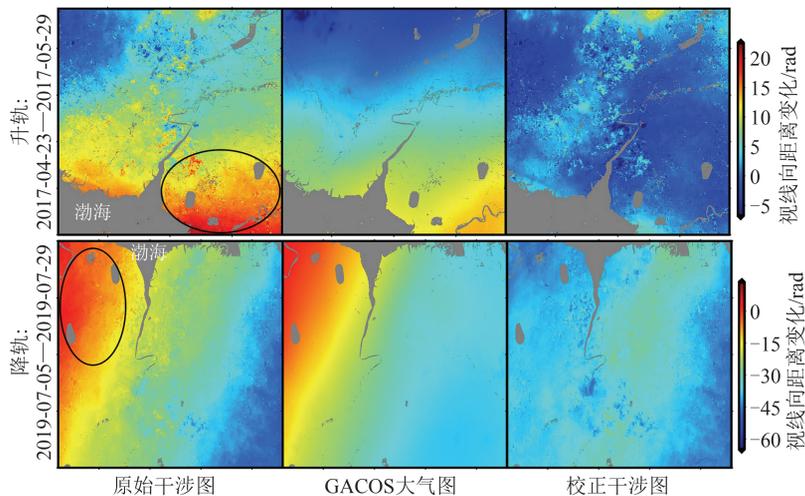


图 2 GACOS 大气校正前后干涉图

Fig. 2 Interferograms Before and After GACOS Atmospheric Correction

干涉图相位的标准差 (standard deviation, StDev) 被广泛用于在假设不存在地表形变时的 InSAR 干涉图大气校正效果<sup>[39]</sup>。在这种情况下,大气延迟是主要信号,相位观测的标准差表征大气信号的严重程度,标准偏差减小表明校正后噪声水平降低。图 3 显示升轨 327 个干涉图(图 3(a))和降轨 268 个干涉图(图 3(b))在大气校正前后标准差的变

化,正值表示校正后标准差减小,负值表示校正后标准差增大。结果显示,升、降轨分别有 202 和 210 个干涉图的大气效应得到了改善,各占全部干涉图数量近 75% 和 64%,这一结果说明 GACOS 大气延迟改正效果的显著性。其中升轨干涉图校正前、后标准差差值的最大值、最小值和平均值分别为 1.29 rad、 $-0.18\text{ rad}$ 、 $0.12\text{ rad}$ ,降轨干涉图校正前、后标准差

差值的最大值、最小值、平均值分别为2.17 rad、-0.6 rad、0.14 rad,表明经过GACOS校正有效减缓了大

气延迟(湍流效应)带来的影响,大气延迟得到明显减弱。

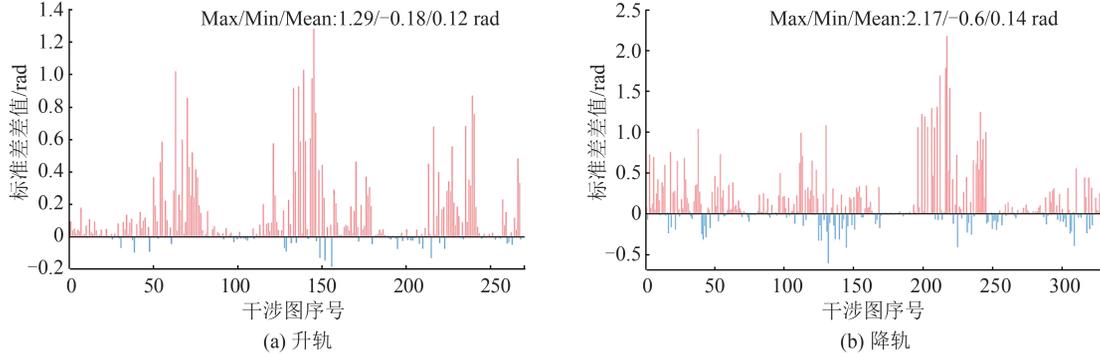


图3 升降轨GACOS校正前后干涉图相位标准差差值统计

Fig. 3 Statistic of Phase Standard Deviation Difference of Interferograms Before and After GACOS Correction of Ascending and Descending.

## 2 研究方法

### 2.1 顾及相干性的SBAS方法

由于研究区位于下辽河平原,属于非城区,缺少散射稳定的“点”目标,因此本文选择SBAS方法提取地表形变。相比于PS-InSAR方法,SBAS方法具有多主影像特征,通过选择合适的空间和时间基线阈值组成差分干涉对,注重于提取相干性保持良好的“面”目标(分布式散射体),更适合于缺少人工建构物的非城市场景。传统SBAS方法以相干性阈值选取目标点,将部分低相干像素点丢弃,导致像素点稀疏,不能完全反映形变信号的空间分布。经过§ 2.2的干涉处理及相位解缠,并利用GACOS去除对流层延迟后,干涉图相位的组成可表示为:

$$\Delta\Phi_i = -\frac{4\pi}{\lambda} m_i + \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R \sin\theta} h_{\text{err}} + \Phi_{\text{atm, res}} + \Delta\Phi_{\text{noise}} \quad (1)$$

式中, $\lambda$ 为电磁波波长; $m_i$ 为地表形变变量; $h_{\text{err}}$ 是高程误差; $R$ 为斜距; $\theta$ 为雷达入射角; $B_{\perp}$ 是垂直基线; $\Phi_{\text{atm, res}}$ 为GACOS校正之后的残余大气误差; $\Delta\Phi_{\text{noise}}$ 为噪声相位。去除形变相位以外的其他相位,便可得到形变位移值。

本文利用改进的SBAS方法进行解算,将干涉图的相位相干性引入到形变信号的反演过程中。与简单地丢弃干涉图中低相干目标点不同,本文在反演方程中考虑了相干性,对相位观测数据赋以权重,从而抑制了部分低相干目标点可能引入的误差<sup>[34,37]</sup>。顾及相干性的相位观测值与形变未知量的反演模型如下:

$$\mathbf{W} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & \cdots & \beta B_{\perp,1} \\ 0 & 1 & 1 & \cdots & \beta B_{\perp,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{\rho}{\Delta t_1} & -\frac{\rho}{\Delta t_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{\rho}{\Delta t_2} & -\frac{\rho}{\Delta t_2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_s \\ h_{\text{err}} \end{bmatrix} = \mathbf{W} [d_1 \ d_2 \ \cdots \ 0 \ 0]^T \quad (2)$$

可利用加权最小二乘方法进行解算<sup>[37]</sup>。式(2)是针对每一个像素而言的,其中 $\mathbf{W} = \text{diag}(r_1, r_2, \cdots, r_n)$ 为权重矩阵, $r_i$ 为该像素的干涉相干性; $\beta = \frac{4\pi}{\lambda R \sin\theta}$ ;  $m_i$ 是组成干涉图的两幅SAR影像时刻之间的位移增量; $d_i$ 是相位观测值; $\rho$ 为平滑因子。设计矩阵的大小为 $n \times (s+1)$ ,其中 $n$ 为干涉图数量(对于本文数据,升轨为327,降轨为268,见表1), $s$ 为位移增量的数量(对于本文数据,升轨为104,降轨为91,见表1)。利用迭代加权最小二乘法逐个对像素求解获得形变时间序列,然后对获得的位移时间序列进行线性回归计算形变年均速率<sup>[11]</sup>。

由于已利用GACOS对每个干涉图进行大气校正,残余的大气延迟主要与大气湍流混合有关,在空间上尺度较小,在时间上表现为不相关,本文在SBAS时序分析中利用时空滤波方法进一步对残余大气进行估计和校正<sup>[38]</sup>。

### 2.2 升降轨二维形变分解

InSAR获取的地表形变是地表三维形变在雷达LOS上的投影,即InSAR仅能获取LOS向的一维形变。对于地下水开采引发的大范围地面沉降而言,其空间范围 $L$ 较大(通常100~1000 km),

含水层深度  $D$  较浅(通常  $0.1\sim 0.5$  km),其形变特征主要表现为垂直向,可直接利用雷达信号的入射角将 LOS 形变转到垂直向( $d_v = \frac{d_{\text{LOS}}}{\cos\theta}$ )。而对于油气开采导致的地面沉降是局部的,范围  $L$  较小(通常  $1\sim 10$  km),油气储层  $D$  较深(通常  $1\sim 5$  km)<sup>[40]</sup>。若忽略水平形变而直接将 LOS 形变转化为垂直向,求得的垂直向形变会存在误差,很难精确反映油田真实地表形变特征及其储层的孔隙压力变化。因此,本文根据升降轨雷达成像几何原理,对升降轨形变结果进行融合分解,获得水平(东西)向和垂直向形变。

目前的 SAR 卫星在近极地轨道飞行,因此, SAR 卫星对于垂直向和东西向的位移较南北向位移更加敏感,所得到的视线向位移中,南北向位移的贡献很小。忽略南北分量位移计算东西向和垂直向形变时,计算得到的位移量标准偏差大大降低<sup>[41]</sup>,表示如下:

$$\begin{bmatrix} d_{\text{asc}} \\ d_{\text{des}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_{\text{asc}} \cos\alpha_{\text{asc}} & \cos\theta_{\text{asc}} \\ -\sin\theta_{\text{des}} \cos\alpha_{\text{des}} & \cos\theta_{\text{des}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_E \\ d_V \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $d_{\text{asc}}$  和  $d_{\text{des}}$  分别为升轨和降轨 LOS 向形变量(如形变速率较为恒定,式(3)同样适用于形变速率分解);  $d_E$  和  $d_V$  分别为东西向和垂直向形分量;  $\theta$  和  $\alpha$  分别为卫星入射角和航向角。由于研究区的油田范围较小(小于 5 km),本文在实际计算过程中,对所有像素采用相同的入射角( $\theta_{\text{asc}} = 39.7^\circ$ ,  $\theta_{\text{des}} = 41.9^\circ$ )和航向角( $\alpha_{\text{asc}} = 346.5^\circ$ ,  $\alpha_{\text{des}} = 193.6^\circ$ ),对式(3)进行最小二乘反演,即可获得东西向和垂直向的形变分量。

### 2.3 油藏压实与沉降建模

油田地表沉降是石油储层孔隙压强变化、储层几何形状、位置及开采量等几何状态与物理状态参数在地表的直观体现。反过来,利用油田地表沉降信息可以反演得到油田的储层参数及开采量信息,为油田开采规划、地质灾害防治保护提供基础数据。利用 InSAR 获取的形变信息结合不同地球物理模型获取储层特征和参数,从而评估储层性质的变化,更好地了解石油开采的特征。

油藏在开采过程中孔隙压力的降低导致有效应力增加,引起油藏体积减小或压实。此时油藏可以看作半无限弹性空间中的一个收缩体,由无数体积无限小的应变单元所组成。开采时发生的弹性形变可以当作每个应变单元的弹性收缩所产生的位移。对于油藏中所有应变单元的位移叠加便可求得该点由于油藏收缩所产生的

总位移。

本文研究中使用储层压缩所引起地表形变模型(图 4),该模型假设储层半径  $R$  大于储层高度  $H$  时,位于深度  $D$  处的圆柱形储层压力变化所导致的地表位移主要发生在垂直方向上<sup>[42]</sup>。此时储层被看作是一个均匀的、各向同性的、具有泊松比  $\nu$  的弹性半空间。垂直分量在距离储层中心  $r$  处的地表位移可表示为:

$$u_z(r) = 2(1-\nu)\Delta HR \int_0^\infty e^{-D\alpha} J_1(\alpha R) J_0(\alpha r) d\alpha \quad (4)$$

式中,  $\Delta H$  为储层压力变化引起压实的储层高度变化;  $J_0$  和  $J_1$  是零阶和一阶贝塞尔函数;  $\rho = r/R$ ;  $\eta = D/R$ ;  $\alpha$  是积分算子的变量。沉降大多以对称式盆地表现,即便被压缩的体积不对称。这种沉降盆地的主要运动方向为垂直方向上,但也存在有水平移动,存在于沉降中心和外边界之间,沉降中心及边界不存在水平移动,且压缩和沉降的发生会随着孔隙压力的变化而存在延迟。

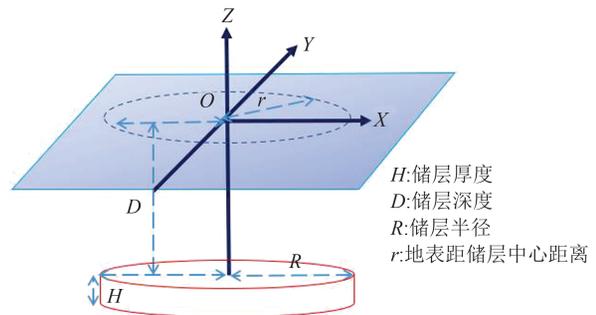


图 4 储层几何模型

Fig. 4 Reservoir Geometry Model

## 3 结果和分析

### 3.1 辽河三角洲区域性地表形变结果

图 5 给出了顾及相干性 SBAS 方法获得的辽河三角洲区域地表形变速率结果,底图为 SAR 影像平均幅度图。虽然升轨和降轨观测角度有差异,但从图 5 来看,升轨(图 5(a))和降轨(图 5(b))LOS 结果在形变量级和形变区域存在较好的一致性,说明本文所用 SBAS 方法的可靠性。图 5 的监测结果显示,辽河三角洲共存在 5 处较明显的地表形变区域(图 5(a)中的红色圆圈区域 A~E),其中有 3 处地表沉降(A、B 和 D 区域)和 2 处地表隆起(C 和 E 区域)。

为进一步了解形变的潜在原因,将形变区域结合谷歌光学影像(图 6)进行对比发现,A、B 沉

降区域分别与曙光采油厂和欢喜岭采油厂重合,表明地下石油开采是地面沉降的主要驱动因素。 $C$ 处位于安屯村居民住宅区,靠近欢喜岭采油厂,该处地表隆起现象可能与当地注水和注气有关。

结合辽河三角洲土地利用情况,渔业养殖是导致 $D$ 处发生地表沉降的主要原因, $E$ 处位于渤海入海口,泥沙淤积是导致该处地表隆起的重要因素<sup>[43-44]</sup>。

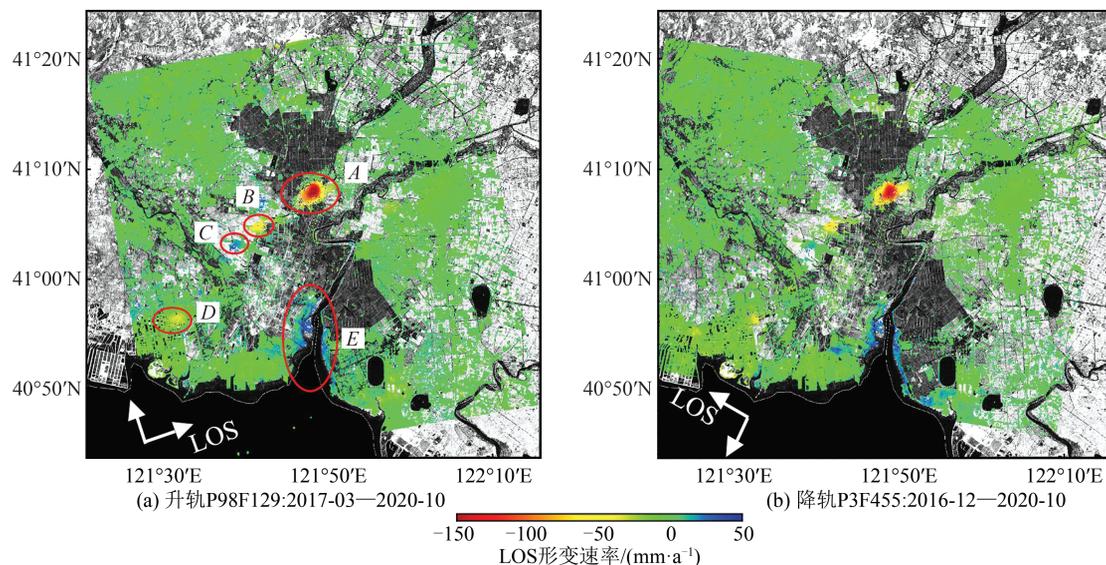


图5 辽河三角洲 LOS 向地表形变速率图(图 5(a)中红色圆圈区域 A~E 为主要形变区)

Fig. 5 LOS Deformation Velocity Rate of Liaohe Delta(The Red Circle Areas A~E in Fig. 5(a) are the Main Deformation Regions)

为了解各形变区域时序位移特征,图 6 分别绘制出了图 5(a)中 A-E 区域  $P1\sim P5$  点的时序位移曲线。为便于分析比较,仅计算两个轨道重叠时间段内(2017-03-2020-10)的累积形变量。其中  $P1$  和  $P2$  点分别位于曙光采油厂和欢喜岭采油厂的沉降中心。曙光采油厂和欢喜岭采油厂均表现出持续性沉降, $P1$  点呈线性沉降, $P2$  点沉降具有一定的季节性规律,这可能与欢喜岭采油厂为保障冬季天然气供给,以实现天然气增产有关。在 LOS 向沉降速率分别为  $158\text{ mm/a}$  和  $73\text{ mm/a}$ ,日液产量的不同是导致这两点 LOS 速率差异的主要原因。位于  $C$  处安屯村的  $P3$  点和  $E$  处渤海入海口的  $P5$  点时序位移曲线呈抬升趋势。 $P3$  点表现出季节周期性抬升,冬季到夏季之间表现为沉降,夏季到冬季之间表现为抬升。这可能与该区域的辽河储气库有关,为了调节天然气季节“供需”不平衡的矛盾,夏季需求少时注入天然气,导致地表抬升;冬季需求旺盛时抽取天然气,导致地表沉降<sup>[45]</sup>。 $P5$  点呈线性抬升趋势,这可能与渤海入海口常年存在泥沙淤积有关<sup>[44]</sup>。监测期间  $P3$  和  $P5$  点最大年平均抬升速率分别达到  $17\text{ mm/a}$  和  $33\text{ mm/a}$ 。 $D$  处  $P4$  点表现为持续性沉降,最大年平均沉降速率达到  $32\text{ mm/a}$ 。两种轨道在监测期间内时序形变结果基本一致,也验证

了本次数据结果的可靠性,同时可以看出所有点的累积时序形变量存在一定差异,主要原因可能是升降轨观测入射角不同和存在水平位移所致。

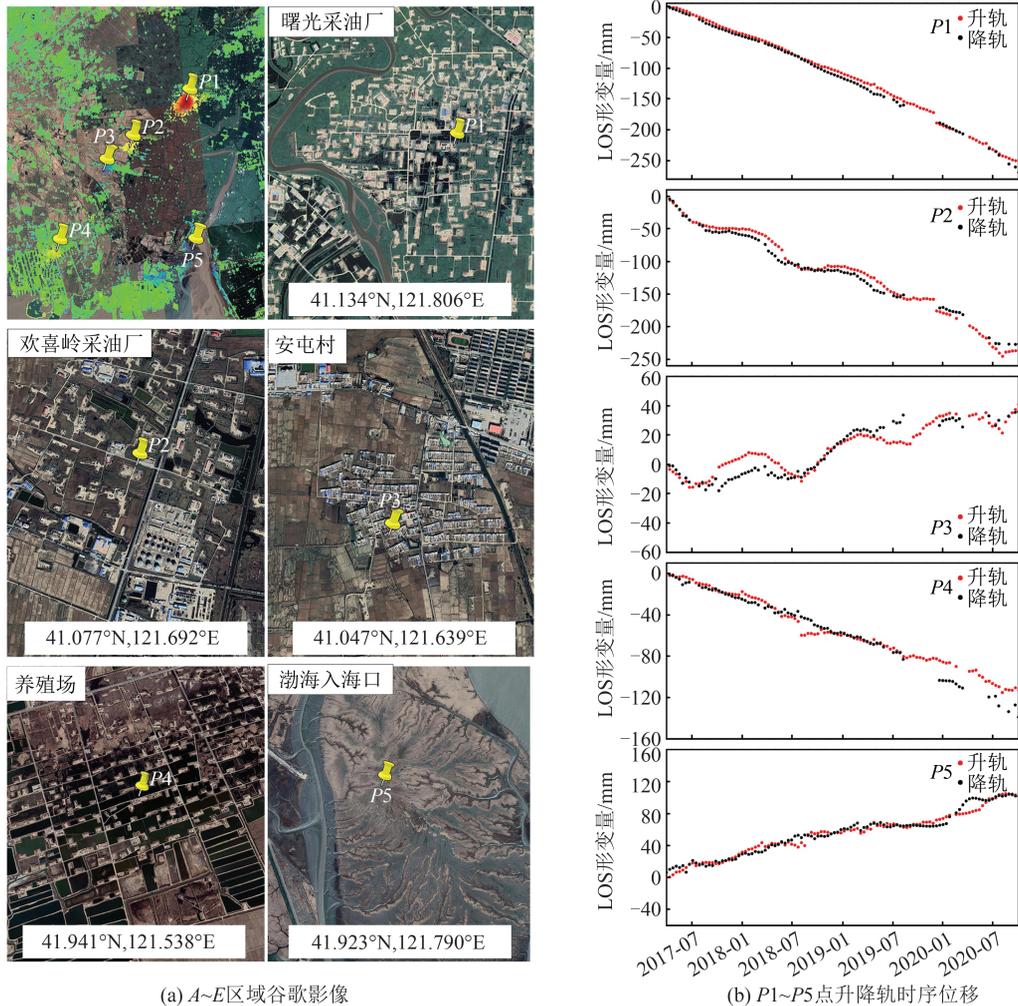
图 7(a) 和 7(b) 分别为曙光采油厂升降轨 LOS 形变速率图,两者在形变分布和量级上基本一致,沉降范围整体呈椭圆形的沉降特征。从两者的东西方向 A-B 剖面图(图 7(c))和南北方向 C-D 剖面图(图 7(d))可以看出,两者剖面在量级和趋势上均存在一定差异,且最大沉降量处位置存在偏差,升降轨影像入射角不同是导致 LOS 速率和剖面结果存在差异的主要因素。东西方向剖面较南北方向剖面差异较大,这与储层岩石的厚度、岩性及其组成成分等都会对地表形变产生扰动作用有关,导致地表沉降空间发生不均匀沉降。因此在以垂直沉降为主导的前提下,可能存在强烈水平位移所带来的贡献,后续需加以验证。

### 3.2 曙光采油厂二维形变结果

InSAR 视线向结果仅为一维方向上的形变,反映不出真实的地表形变。为验证 § 4.1 提及的东西方向可能存在水平位移,基于升降轨进行二维形变分解(如 § 3.2 所述),提取了曙光采油厂区域的地表垂直向和水平向形变(图 8(a) 和 8(b))。结果显示,曙光采油厂在垂直方向上的形变表现

为地表下沉,空间分布呈 NE-SW 方向延伸的椭圆形,最大沉降速率达到 198 mm/a(图 8(a))。水平分解速率显示该油田存在水平位移(图 8(b)),在空间分布上呈现出东西两侧向沉降中心移动的趋势,东西两侧移动速率量级基本一致,最大水平形变速率达到了  $-62 \text{ mm/a}$ (朝西运动)。由于不均匀沉降很容易对建筑物和管道设施造成破坏,尤其是位于“沉降漏斗”边缘时,会对其上的各类设施安全构成严重威胁。以东西 A-B 方向

提取垂直和水平形变速率剖面,图 8(c)显示垂直速率呈均匀变化的趋势,沉降最大处位于油田中心;图 8(d)显示以油田中心为分界处,东西方向均朝着油田地面沉降中心发生水平移动。由于缺少外部地面观测数据(如 GPS 或水准测量),本文无法验证 SBAS-InSAR 观测结果。唯一可能的定性判断是根据杨崇等<sup>[27]</sup>的研究进行的,该研究同样揭示了油田的持续沉降,与本文的观测结果基本一致。



(a) A~E 区域谷歌影像

(b) P1~P5 点升降轨时序位移

图 6 A~E 区域谷歌影像及 P1~P5 点的升降轨时序位移

Fig. 6 Google Earth Image of A-E Regions and LOS Displacement Time Series at Points P1-P5 of Ascending Result and Descending Result

### 3.3 油田储层压实沉降反演

辽河油田沉降是由石油持续性开采引起的,石油生产引起基体结构中的晶粒之间有效应力增加,导致储层压实,储层压实产生的力学效应传播到地表表现为沉降。基于§2.3 所提及的储层压实沉降模型,该模型假设储层上方的地表形变主要发生在垂直方向上,本文以曙光采油厂为例,选取储层参数为:埋藏深度  $D = 1000 \text{ m}$ ,剪切

模量  $E = 2 \text{ Gpa}$ ,泊松比  $\nu = 0.25$ 。

图 9 显示了 InSAR 观测的垂直形变速率(图 9(a))和模型拟合结果(图 9(b))以及两者的残差值(图 9(c)),同时为了验证模型结果与垂直形变之间的差异,绘制出了东西 A-B 方向各自的剖面图(图 9(d))与残差的直方图(图 9(e))。可以看出,该模型较好地模拟出曙光油田的地表垂直形变(沉降)。模型结果与观测值形变范围分布一

致,从剖面图也可以看出形变量级和趋势上拟合都较为接近。整体残差结果主要集中于沉降圆盘外区域,这与假设该储层为均匀的圆形弹性半空间有直接联系,该模型对于圆形油藏可能会有更好的模拟效果。同时直方图接近正态分布,大部分残差集中于0附近。建模过程中各种不确定

储层物理因素是导致差异的关键因素,典型的不确定性包括储层岩石的压实系数值及其储层周围直至地表的地质力学响应等。由于缺少注水和采油资料,无法进一步分析油厂沉降与开采量、注水量以及其他活动之间的联系,这也是未来需要进一步深入研究的工作。

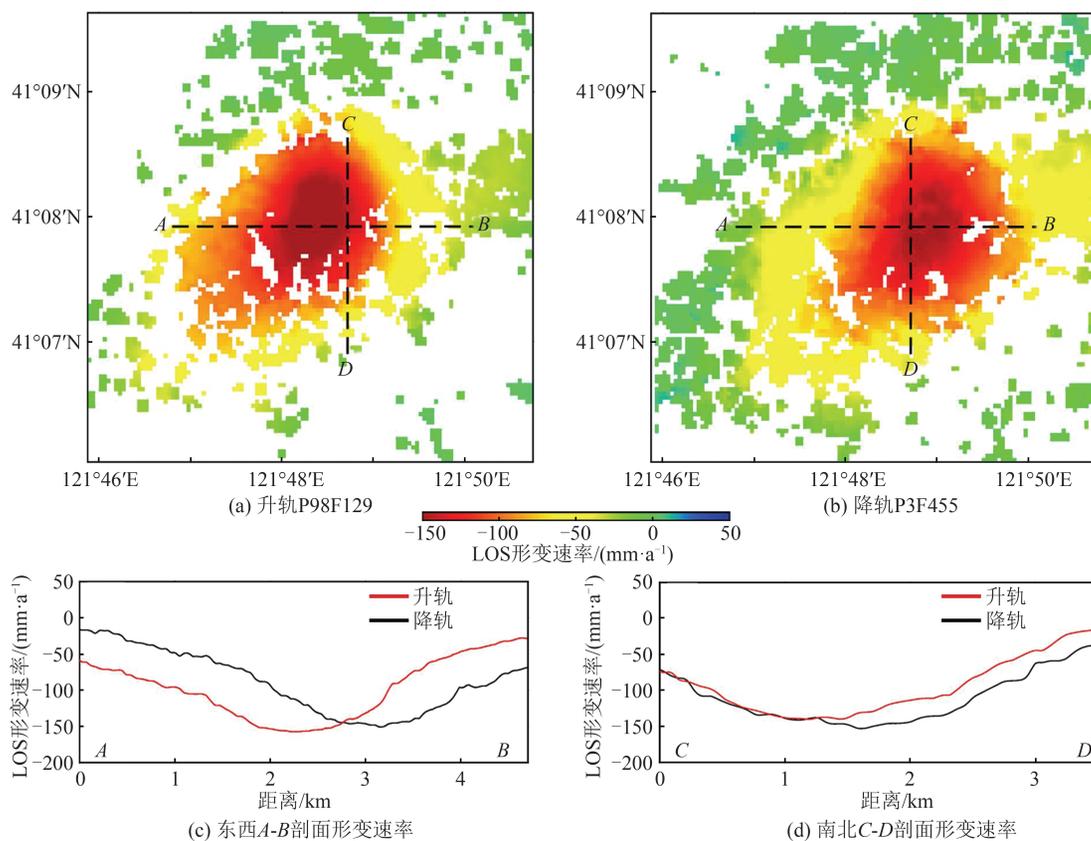


图7 曙光采油厂升降轨LOS沉降速率图

Fig. 7 Ascending and Descending LOS Deformation Velocity Rates in Shuguang Oilfield

结合 InSAR 观测得到的曙光油田地表形变结果,该模型能较好地适用于油田垂直向沉降模拟,模拟结果与 InSAR 观测值基本一致,较好地反映了储层压实与地表形变之间的联系,但更加详细的储层性质信息可增强模型的抗扰性,更加适用于储层的动态变化模拟。该模型的建立为了解曙光油田开采所导致的地表沉降与储层压实之间的联系提供了一定的理论基础,对地表基础设施如井故障或套管损坏等产生影响,同时为曙光油田的进一步开采提供可靠性理论。

## 4 结 语

本文以辽河油田为研究对象,采用时序 SBAS-InSAR 监测 2017—2020 年间油田开采导致的地表沉降。进一步以曙光采油厂为例,验证

储层压实沉降模型对于油田沉降监测的适用性。主要研究结论如下:

1) 辽河三角洲区域出现了 5 处地表形变区,包含 3 处沉降和 2 处隆起。其中油气开采区与地表沉降监测区域基本一致,且曙光油田沉降最为严重,呈持续性线性沉降。

2) 升降轨融合模型分解结果显示曙光采油厂存在显著的水平位移,东西方向上的位移均朝向油田沉降中心。监测时间内最大垂直沉降速率达到 198 mm/a,最大水平形变速率达到 -62 mm/a (朝西运动)。

3) 石油的开采会引起储层孔隙压力下降与储层压实,进而导致地表沉降。储层压实沉降模型较好地反映了储层压力变化与地表沉降之间的关系。本文结果为辽河三角洲地表形变灾害防治提供科学依据,对采油区地面沉降规律认识及油气开采具有现实意义。

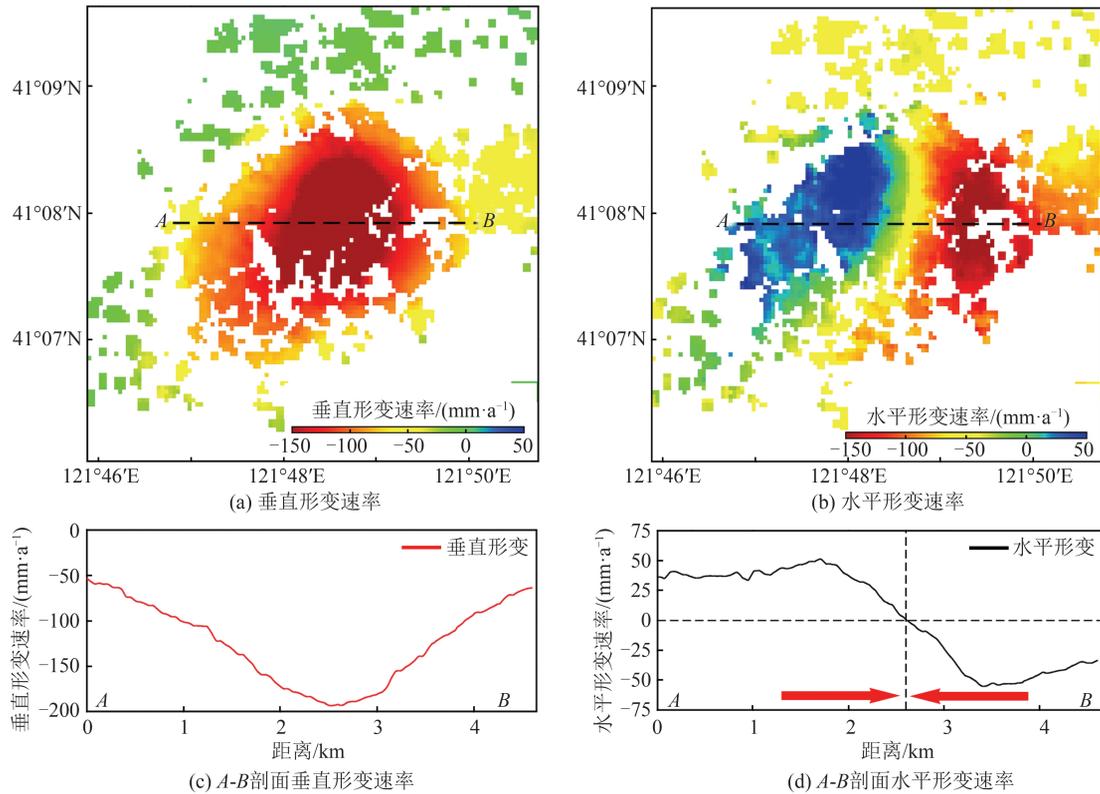


图 8 二维分解形变速率图

Fig. 8 Diagrams of Two-Dimensional Decomposition Deformation Velocity Rate

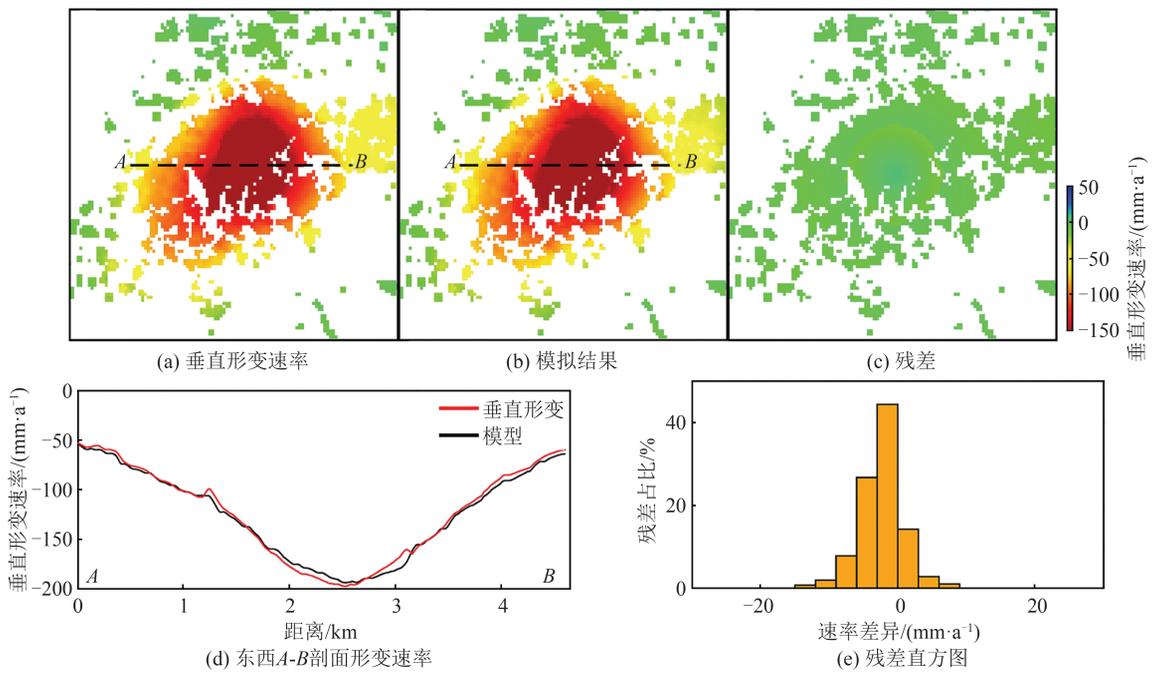


图 9 储层压实沉降模型反演结果

Fig. 9 Inversion Results of Reservoir Compaction Settlement Model

参 考 文 献

[1] Khakim M Y N, Tsuji T, Matsuoka T. Geomechanical Modeling for InSAR-Derived Surface Deformation at Steam-Injection Oil Sand Fields [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*,

2012, 96-97: 152-161.

[2] Yang C S, Zhang D X, Zhao C Y, et al. Ground Deformation Revealed by Sentinel-1 MSBAS-InSAR Time-Series over Karamay Oilfield, China [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(17): 2027.

[3] Loesch E, Sagan V. SBAS Analysis of Induced

- Ground Surface Deformation from Wastewater Injection in East Central Oklahoma, USA [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 283.
- [4] Bayramov E, Buchroithner M, Kada M, et al. Quantitative Assessment of Vertical and Horizontal Deformations Derived by 3D and 2D Decompositions of InSAR Line-of-Sight Measurements to Supplement Industry Surveillance Programs in the Tengiz Oilfield (Kazakhstan) [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(13): 2579.
- [5] 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.
- [6] di Traglia F, de Luca C, Manzo M, et al. Joint Exploitation of Space-Borne and Ground-Based Multi-temporal InSAR Measurements for Volcano Monitoring: The Stromboli Volcano Case Study [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 260: 112441.
- [7] Yang Yunfei. Research on Crustal Activity in Tengchong Volcanic Area Based on InSAR/GPS Data [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2021. (杨云飞. 基于InSAR/GPS数据的腾冲火山区域地壳活动性研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2021.)
- [8] Gong Xiwen, Zhang Zhengjia, Chen Qihao, et al. 3D Co-seismic Deformation Field of the Jiuzhaigou Earthquake Based on DInSAR and MAI Technology [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2021, 30(5): 49-57. (宫熙雯, 张正加, 陈启浩, 等. 融合DInSAR和MAI技术反演九寨沟地震三维形变场[J]. 测绘工程, 2021, 30(5): 49-57.)
- [9] Xiao Z H, Freymueller J T, Grapenthin R, et al. The Deep Shumagin Gap Filled: Kinematic Rupture Model and Slip Budget Analysis of the 2020 Mw 7.8 Simeonof Earthquake Constrained by GNSS, Global Seismic Waveforms, and Floating InSAR [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 576: 117241.
- [10] Li Menghua, Zhang Lu, Dong Jie, et al. Detection and Monitoring of Potential Landslides Along Minjiang River Valley in Maoxian County, Sichuan Using Radar Remote Sensing [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1529-1537. (李梦华, 张路, 董杰, 等. 四川茂县岷江河谷区段滑坡隐患雷达遥感识别与形变监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1529-1537.)
- [11] Tang W, Motagh M, Zhan W. Monitoring Active Open-Pit Mine Stability in the Rhenish Coalfields of Germany Using a Coherence-Based SBAS Method [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 93: 102217.
- [12] He Q, Zhang Y H, Wu H A, et al. Mining Subsidence Monitoring with Modified Time-Series SAR Interferometry Method Based on the Multi-level Processing Strategy [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 106039-106048.
- [13] Botey i Bassols J, Vázquez-Suné E, Crosetto M, et al. D-InSAR Monitoring of Ground Deformation Related to the Dewatering of Construction Sites. A Case Study of Glòries Square, Barcelona [J]. *Engineering Geology*, 2021, 286: 106041.
- [14] Liu L, Jiang L M, Jiang H J, et al. Accelerated Glacier Mass Loss (2011-2016) over the Puruogangri Ice Field in the Inner Tibetan Plateau Revealed by Bistatic InSAR Measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111241.
- [15] Liu Y L, Huang H J, Dong J F. Large-Area Land Subsidence Monitoring and Mechanism Research Using the Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar Technique over the Yellow River Delta, China [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2015, 9(1): 096019.
- [16] Venera J, Anton F, Irina K, et al. SAR Interferometry Technique for Ground Deformation Assessment on Karazhanbas Oilfield [J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 100: 1163-1167.
- [17] Togaibekov A, Herring T. Monitoring of Oil-Production-Induced Subsidence and Uplift [D]. San Francisco: Department of Earth Atmospheric and Planetary Sciences, 2020.
- [18] Sun H, Zhang Q, Zhao C Y, et al. Monitoring Land Subsidence in the Southern Part of the Lower Liaohe Plain, China with a Multi-track PS-InSAR Technique [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 188: 73-84.
- [19] Sun Qifa, Tian Hui, Zhang Kuo. Study on the History of Land Subsidence in Lower Liaohe River Plain [J]. *Geology and Resources*, 2014, 23(5): 450-452. (孙岐发, 田辉, 张扩. 下辽河平原地区历史地面沉降情况研究[J]. 地质与资源, 2014, 23(5): 450-452.)
- [20] Liu Yuefeng, Wu Lun, Han Mukang, et al. The Rising Trend of Sea Level in Liaohe Delta and Its Impact Assessment [J]. *Haiyang Xuebao*, 1998, 20(2): 73-82. (刘岳峰, 邬伦, 韩慕康, 等. 辽河三角洲地区海平面上升趋势及其影响评估[J]. 海洋学报, 1998, 20(2): 73-82.)

- [21] Li Shaowei, Miao Xiongyi, Ding Xigui, et al. Geo-environmental Issues Along the Coast of Liaohe River Delta and Suggestions [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2013, 29(9): 37-44. (李少伟, 缪雄谊, 丁喜桂, 等. 辽河三角洲海岸带环境地质与调查研究[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(9): 37-44.)
- [22] Li Li'na. Analysis of Regional Rainstorm and Flood Disaster Characteristics in Liaohe Oilfield [J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2018, 36(1): 45-47. (李丽娜. 辽河油田区域暴雨洪水灾害特性分析[J]. 东北水利水电, 2018, 36(1): 45-47.)
- [23] Fight Against the Flood, 90% of PetroChina's Liaohe Oilfield Shuts Down Wells and Resumes Production [N]. *China Petroleum News* (2021-01-29) [2022-01-29]. <http://news.cnpc.com.cn/system/2019/09/02/001743389.shtml>. (全力抗洪, 中石油辽河油田九成关停井复产[N]. 中国石油报 (2021-01-29) [2022-01-29]. <http://news.cnpc.com.cn/system/2019/09/02/001743389.shtml>.)
- [24] Mu Lianbo, Zhang Jing. Elevation Observation and Application of Moisture-Proof Dike in Shuguang Oil Production Plant of Liaohe Oilfield [J]. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 2014, 42(1): 72-73. (穆连波, 张静. 辽河油田曙光采油厂防潮堤高程观测及应用[J]. 黑龙江水利科技, 2014, 42(1): 72-73.)
- [25] Zhang Jing, Ding Huangping, Liu Chun, et al. Monitoring Land Subsidence in Panjin Area Based on In SAR Method [J]. *Global Geology*, 2019, 38(2): 574-580. (张静, 丁黄平, 刘纯, 等. 基于 InSAR 技术的盘锦地区地面沉降研究[J]. 世界地质, 2019, 38(2): 574-580.)
- [26] 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. (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.)
- [27] 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. (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.)
- [28] Yang C. Monitoring the Large Gradient Land Subsidence Caused by Oil Exploitation Based on StaMPS [J]. *Geomatics Science and Technology*, 2019, 7(2): 74-82.
- [29] Li Xiaoguang, Chen Yongcheng, Li Yujin, et al. Petroleum Exploration History and Enlightenment of Liaohe Depression in Bohai Bay Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(3): 291-301. (李晓光, 陈永成, 李玉金, 等. 渤海湾盆地辽河坳陷油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(3): 291-301.)
- [30] Ecology and Environment Bureau of Panjin. Environmental Impact Report of Shuguang Oilfield Heavy Oil Block Production Capacity Construction and Supporting Projects Liaohe Oilfield in 2021-2025 [EB/OL]. (2021-06-18). [http://sthjj.panjin.gov.cn/2021\\_06/18\\_14/content-332370.html](http://sthjj.panjin.gov.cn/2021_06/18_14/content-332370.html). (盘锦市生态环境局, 辽河油田曙光采油厂稠油区块产能建设 2021-2025 五年开发项目环境影响报告书 [EB/OL]. (2021-06-18). [http://sthjj.panjin.gov.cn/2021\\_06/18\\_14/content-332370.html](http://sthjj.panjin.gov.cn/2021_06/18_14/content-332370.html).)
- [31] Ecology and Environment Bureau of Panjin. Environmental Impact Report of Huanxiling Oilfield Production Capacity Construction and Supporting Projects in 2021-2025 (Panjin) [EB/OL]. (2021-06-18). [http://sthjj.panjin.gov.cn/2021\\_06/18\\_14/content-332370.html](http://sthjj.panjin.gov.cn/2021_06/18_14/content-332370.html). (盘锦市生态环境局, 欢喜岭采油厂欢喜岭油田 2021-2025 年产能建设及配套工程项目(盘锦)环境影响报告书 [EB/OL]. (2021-06-18). [http://sthjj.panjin.gov.cn/2021\\_06/18\\_14/content-332370.html](http://sthjj.panjin.gov.cn/2021_06/18_14/content-332370.html).)
- [32] Yang Sisi. Study on Countermeasures of Ecological Compensation of Wetland in Panjin [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (杨斯斯. 盘锦湿地生态补偿问题对策研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.)
- [33] Shi M, Gong H L, Gao M L, et al. Recent Ground Subsidence in the North China Plain, China, Revealed by Sentinel-1A Datasets [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(21): 3579.
- [34] Xu X H, Sandwell D T, Tymofyeyeva E, et al. Tectonic and Anthropogenic Deformation at the Cerro Prieto Geothermal Step-over Revealed by Sentinel-1A InSAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(9): 5284-5292.
- [35] Farr T G, Rosen P A, Caro E, et al. The Shuttle Radar Topography Mission [J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2).