引文格式：雷一鸣,唐伟,刘茂华. 锦州采油厂地面沉降时序 InSAR 监测与分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(7): 17-20. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.07.004

锦州采油厂地面沉降时序InSAR监测与分析

雷一鸣[1]，唐　伟[1*]，刘茂华[2]
（1. 中国矿业大学（北京） 地球科学与测绘工程学院，北京 100083；2. 沈阳建筑大学 交通与测绘工程学院，辽宁 沈阳 110168）

摘　要：锦州采油厂作为辽河三角洲地区的重要能源基地之一，油田开采活动频繁，地面沉降问题显著，对油田安全生产和周边基础设施构成严重威胁。基于2017—2021年Sentinel-1卫星的升降轨InSAR数据，利用小基线集时序InSAR分析技术获取了锦州采油厂的地表沉降速率和沉降时间序列；再利用升降轨融合分解方法提取了形变区域的垂直和东西向形变。结果表明：①锦州采油厂存在明显的沉降现象，油田区开采中心最大垂直沉降速率为50.9 mm/a；②锦州采油厂存在明显的水平位移，东西向水平位移指向油田沉降中心，最大水平位移速率为26.0 mm/a；③结合油藏压实沉降模型模拟了锦州采油厂的地表沉降，确定了油田开采活动与地表沉降的联系。

关键词：锦州采油厂；InSAR；地面沉降；时序分析；二维形变分解
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）07-0017-04

Monitoring and Analysis of Surface Subsidence at the Jinzhou Oilfield Using Time Series InSAR

LEI Yiming[1], TANG Wei[1], LIU Maohua[2]
(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
2. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: As one of the significant energy bases in the Liaohe Delta region, the Jinzhou Oilfield is subject to intense oil extraction activities, leading to significant surface subsidence issues that pose a severe threat to the safe production of oilfield and surrounding infrastructure. Based on the ascending and descending orbit interferometric synthetic aperture radar (InSAR) data from Sentinel-1 satellite from 2017 to 2021, we utilized the small baseline subset InSAR time series technique to acquire the surface deformation velocity and time series data of the Jinzhou Oilfield. Furthermore, we used a fusion decomposition method for ascending and descending orbits to extract the vertical and east-west directional deformations of deformation areas. The findings of this study indicate that ①the Jinzhou Oilfield exhibits noticeable subsidence, with the maximum vertical subsidence speed at the extraction center of oilfield area reaching 50.9 mm/a. ②The Jinzhou Oilfield experiences significant horizontal displacement, with east-west horizontal displacement directed towards the subsidence center of oilfield, reaching a maximum speed of 26.0 mm/a. ③By integrating the reservoir compaction subsidence model, the surface subsidence of the Jinzhou Oilfield was simulated, establishing a link between oilfield extraction activities and surface subsidence.

Key words: the Jinzhou Oilfield, InSAR, surface subsidence, time series analysis, 2D deformation decomposition

石油产业对经济发展至关重要，但开采活动引发的地表沉降对油田生产和环境安全构成威胁。辽河油田是我国重要的采油基地，石油需求的增加导致过度开采、引发地面沉降，损害了建筑和设施，威胁油井安全。同时，地面沉降造成的高程损失叠加海平面上升的影响，加快了相对海平面的上升速率，使得沿海地区洪涝灾害风险加剧[1]。因此，监测油田沉降对石油产业发展与海岸带防灾减灾至关重要。合成孔径雷达干涉（InSAR）技术自1969年首次应用于雷达数据处理以来[2]，已发展为能监测厘米至毫米级地表微小形变的技术[3]。随着时空相干性研究的深入，永久散射体InSAR（PS-InSAR）和小基线集InSAR（SBAS-InSAR）相继被提出[4-5]，通过跟踪稳定目标和短基线子集划分的方式减少失相干的影响，提高监测的精度和可靠性，使得InSAR技术被广泛应用于形变监测[6-7]。地学模型与信号处理方法的推广，提升了InSAR监测的精度，拓展了InSAR技术的应用深度[8]。虽然已有学者利用InSAR技术研究了辽河油田地面沉降问题[9-11]，有

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42374023）。
第一作者简介：雷一鸣（2002—），硕士研究生，研究方向为InSAR数据处理与地面形变解译，E-mail：946646523@qq.com。
通信简介：唐伟（1987—），博士，副教授，研究方向为空间大地测量与遥感技术（SAR/InSAR/GNSS）及其应用，E-mail：weitang@cumtb.edu.cn。

效揭示了沉降演变和成因；但在获取垂直向形变时大多忽略了水平运动的影响，导致垂直形变精度受限，且目前尚未有研究针对锦州采油厂进行具体的沉降分析。因此，本文基于2017—2021年Sentinel-1卫星升降轨数据，采用SBAS-InSAR技术结合升降轨融合的二维形变分解技术，全面分析了锦州采油厂沉降的时空分布和演化规律；并通过油藏压实模型反演沉降，验证监测效果，分析储层压实与沉降的内在关联。预期研究结果将提高沉降监测的精度和可靠性，为油田沉降监测提供新的视角。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

锦州采油厂位于油气资源丰富的辽河三角洲西南部，毗邻渤海与辽河、大凌河入海口，气候湿润、水汽丰富，植被覆盖度较高，南部存在大量海水渔场、海水养殖池。锦州采油厂是辽河三角洲重要的采油厂之一，面积约为20 km^2。油厂所在油田1984年11月投产，常年进行石油资源开采，2010年进入开发后期，虽通过综合治理，但仍无法弥补产量递减，年产综合递减约为15%。随着油气资源的减少，油田地层综合含水量上升，地层压力降低，油田地表逐渐出现沉降现象[12]。

1.2 SAR数据收集

本文采用Sentinel-1卫星SAR数据进行地表形变提取，共收集2017—2021年104期升轨（Path98 Frame129）影像和91期降轨（Path3 Frame455）影像。影像空间覆盖了包括锦州采油厂在内的辽河油田；空间分辨率为5 m×20 m，卫星重访周期为12 d，具有足够的时间分辨率保证地表形变的时序变换分析。同时，本文收集了1个GNSS监测站点的时序监测数据，用以对形变结果进行验证。GNSS测量数据监测时间为2020年12月—2022年12月，与雷达观测时段有较大重合，可达到结果验证的目的。本文采用NASA雷达地形测绘任务30 m分辨率的DEM去除地形相位[13]。

2 数据处理

2.1 InSAR干涉与SBAS时序处理

本文的数据干涉处理与SBAS-InSAR时序处理均采用GMTSAR软件。设置空间基线阈值为150 m，时间基线阈值为50 d[1]。升轨数据生成了327幅干涉图，降轨数据生成了268幅干涉图。为抑制干涉相位误差，利用Goldstein滤波处理干涉图相位，并采用SNAPHU对干涉图进行相位解缠；再通过最小二乘法解算线性形变方程与高程方程，以获取形变相位[14]。由于研究区气候湿润、水汽丰富，干涉时采用GACOS方法对全幅影像进行误差校正，可有效去除对流层延迟误差[15]；并在时序分析中，通过设置空间低通滤波窗口和时间高通滤波窗口去除残余噪声相位与部分大气延迟相位[16]。基于干涉获得的真实形变相位，通过设置入射角、平滑系数波长、大气校正循环次数等参数，利用GMTSAR完成形变时序处理[17]。时序处理将生成累计沉降结果、年平均形变速率值与时序误差等结果。

2.2 升降轨融合的二维形变分解

InSAR技术受成像原理限制，只能观测雷达视线向（LOS）的一维运动，无法全面捕获地表三维运动。研究中通常假设变形仅发生在垂直方向，将LOS值投影至垂直方向分析[18]，但在水平运动显著的区域将产生较大误差。由于雷达卫星一般为近极地轨道卫星，监测结果中南北向位移贡献极小[19]，因此可结合升降轨影像计算垂直和东西向二维形变。该方法可减少一维形变偏差，适用于多种沉降环境。结合两轨观测的几何特点，LOS向距离可借助轨道入射角进行垂直和东西方向的向量分解，与轨道航向角构成分解矩阵，将观测值 d 分解为两个方向的二维位移速率。分解LOS向的计算矩阵为：

$$\begin{bmatrix} d_{asc} \\ d_{des} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_{asc}\cos\alpha_{asc} & \cos\theta_{asc} \\ -\sin\theta_{des}\cos\alpha_{des} & \cos\theta_{des} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_E \\ d_U \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中，d_{asc}、d_{des} 分别为卫星轨道升降方向的LOS向观测值；d_E、d_U 分别为研究区地表在东西向和垂直向的形变分量；θ 为卫星入射角；α 为航向角。

角度投影的几何关系决定了形变分解方程的系数矩阵。由于通过固定入射角进行最小二乘将存在因像元而异的误差，因此本文采用加权最小二乘和均方根矩阵来加权调整矩阵，以实现更准确的形变分解。

2.3 油藏储层压实机理与沉降模型构建

油藏压实是指油气开采过程中储层体积减少、孔隙增大、流体压力降低，导致上覆岩层下移，累积形成地表沉降的过程。随着流体的抽取，孔隙压力逐渐降低，岩石骨架的压缩变形初始为可逆的弹性形变，但超过弹性极限后，形变转变为不可逆的塑性形变，岩石下沉导致地表沉降[20]。当油藏半径明显大于油藏厚度时，沉降首先表现在垂直方向上，压实机理与沉降的关系可简化理解为厚度为 H 的油藏储层在垂直方向上发生弹性单轴压实，且假设垂向应力在整个过程中保持不变，储层内部压力均匀变化。此时油藏空间可看

作能离散化为无数体积无限小的微元的均质半无限空间弹性体。可构建模型模拟单个微元的弹性形变情况；再通过积分叠加，模拟完整的储层空间地表形变[21]。

本文模型基于 Geertsma 应变核位移解理论，以孔隙弹性理论为基础，通过计算应变核（微元）的位移并积分求解地表形变。模型最初用于模拟石油储层开采导致的场区压缩沉降，取得了良好的效果[22]。模型模拟了一个深度为 D 、半径为 R 明显大于厚度 H 的圆柱形储层在孔隙压力下降 Δp 时垂直方向的地表位移。模型储层拥有特定的泊松比 υ ，垂直分量在距离储层中心 r 处的地表位移可表示为[1]：

$$u_z(r)=2(1-v)\Delta H\times R\int_0^{\infty}e^{-D\alpha}J_1(\alpha R)J_0(\alpha r)\mathrm{d}\alpha \qquad (2)$$

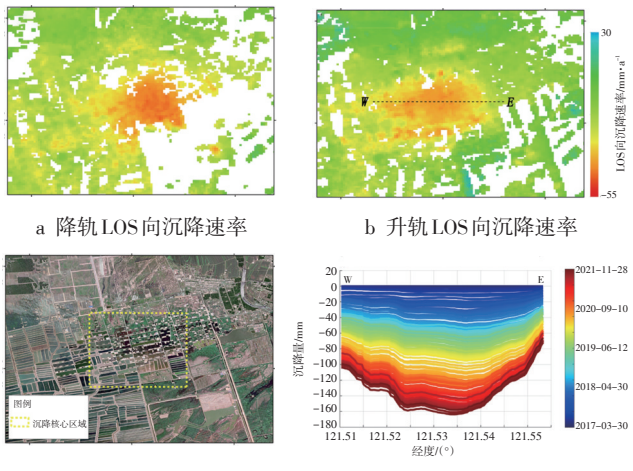
式中，ΔH 为储层压力变化引起压实的储层高度变化；J_0 、J_1 分别为零阶和一阶贝塞尔函数。

通过设置埋藏深度、储层半径与泊松比等参数，即可实现对油田储层压实沉降的模拟。

3　研究结果与分析

3.1　锦州采油厂升降轨 LOS 向沉降监测结果

通过 SBAS-InSAR 时序分析，本文获取了 2017—2021 年的 LOS 向地表沉降速率（图 1a、1b），可以看出，2021 年底锦州采油厂开采区已形成了显著的沉降区，升轨数据监测到的 LOS 向最大沉降速率为 37.2 mm/a，降轨数据监测到的 LOS 向最大沉降速率为 46.1 mm/a。以升轨结果为例，绘制东西（W—E）向累积沉降量时序剖面图（图 1d），可以看出，锦州采油厂的沉降现象随时间的推进逐步加剧，形成了漏斗状的沉降区域，近 5 年的最大累积沉降量超过 160 mm。



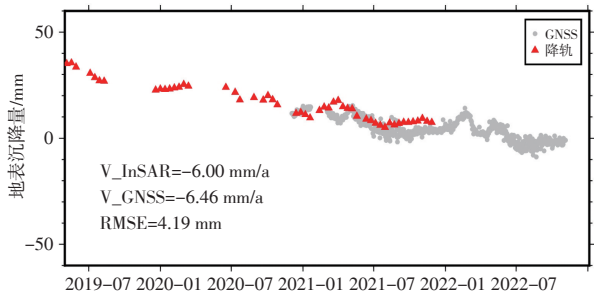
a 降轨 LOS 向沉降速率　　b 升轨 LOS 向沉降速率

c 沉降核心区域光学影像　　d 剖面 W-E 向地面沉降时序演变

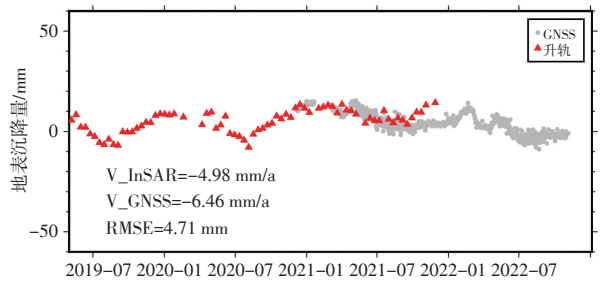
图 1　锦州采油厂升降轨 InSAR 视线向沉降速率

3.2　InSAR 与 GNSS 形变比较

本文采用 GNSS 观测站数据验证 InSAR 形变结果，将 GNSS 三维测量结果转换为升降轨 LOS 向，并以该监测点为准统一时间与空间基准，对沉降监测结果进行对比，结果见图 2，可以看出，InSAR 与 GNSS 结果的一致性较高，沉降速率接近，且二者沉降量的均方根误差均小于 5 mm。通过对比发现，升轨与降轨的监测结果存在一定差异，推测是水平运动对 LOS 向结果产生了影响。本文利用升降轨融合的二维形变分解方法，尝试分解位移的垂直与水平运动信息，使沉降监测结果更接近地表真实情况，提高监测准确性。



a 降轨数据



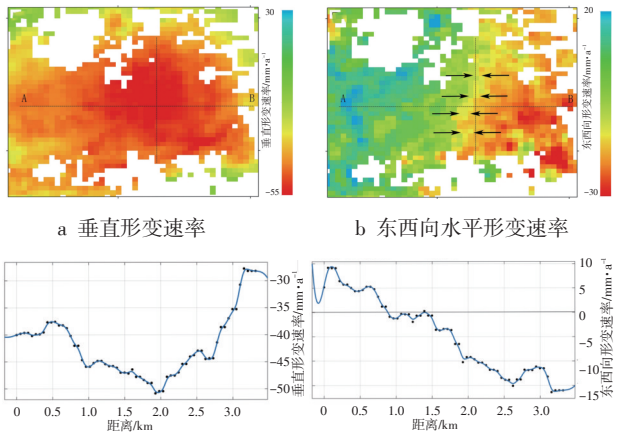
b 升轨数据

图 2　InSAR 与 GNSS 时序形变比较

3.3　锦州采油厂形变分解与空间分布分析

本文针对沉降核心区域（图 1c 中黄色矩形框）开展二维分解，获取垂直和水平向形变信息，结果见图 3，可以看出，锦州采油厂垂直向形变表现为地表下沉，分布呈近椭圆形沉降漏斗，最大垂直沉降速率为 50.9 mm/a；水平形变的最大向东速率为 18.2 mm/a，最大向西速率为 26.0 mm/a，证明锦州采油厂存在显著的水平位移。

为直观分析锦州采油厂地表形变空间分布，本文提取了垂直与水平形变结果的东西（A-B）方向剖面（图 3c、3d），可以看出，垂直沉降速率由沉降中心向边缘递减；图中正值代表地表向东移动，负值代表西向位移，呈现出沉降中心西部向东运动、东部向西运动、沉降中心附近几乎无水平运动的现象，整体呈沉降区两侧向中心汇聚的趋势。升轨、降轨、升降轨融合沉降速率见表 1，可以看出，GNSS 监测点处沉降速率为 6.46 mm/a，对比单轨形变监测结果，分解后的形变速率与 GNSS 测量结果的差值明显减少，说明融合分解后的结果更接近地表真实情况。



a 垂直形变速率　b 东西向水平形变速率

c 垂直形变东西（A–B）剖面图　d 水平形变东西（A–B）剖面图

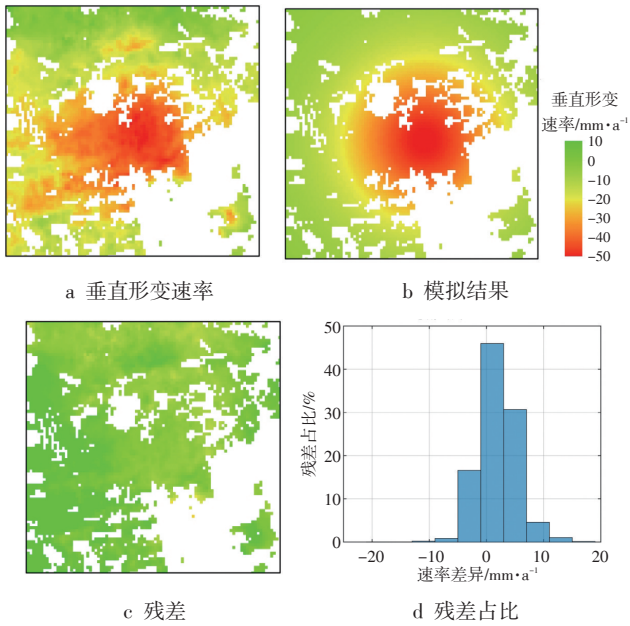
图3 锦州采油厂二维形变速率分解结果

表1 升轨、降轨、升降轨融合沉降速率及差值统计/mm·a⁻¹

数据类型	降轨	升轨	融合后垂直向
InSAR速率	–6.00	–4.98	–6.34
GNSS速率	–6.46	–6.46	–6.46
差值	0.46	1.48	0.12

3.4 油田储层压实沉降模拟

研究区储层岩性以含油砂岩为主，据此假定储层泊松比为0.25[23]。根据油田储层地层的地质信息[12]，设置埋藏深度为1 600 m，储层半径为1 000 m。由储层压实沉降模型模拟结果来看（图4），与InSAR分解得到的垂直形变速率的数量级、形变分布和形变趋势存在较好的一致性；由二者速率残差结果来看，沉降核心区残差趋近于0，图框边缘距沉降核心较远处残差值较高；由残差分布直方图来看，残差速率绝对值基本不超过10 mm/a，说明InSAR形变分解结果与该模型拟合效果较好。



a 垂直形变速率　b 模拟结果

c 残差　d 残差占比

图4 储层压实沉降模型模拟结果与InSAR观测结果的对比

本文通过油藏储层压实机理分析与储层压实沉降模型反演，验证了InSAR形变监测结果的可靠性，进一步分析了储层压实与采油厂地表沉降的内在联系，揭示了从油气开采到储层压实再到地表沉降的油田沉降过程。同时，储层压实与地表沉降联系的确定也将成为油田开采中沉降防治的理论基础。

4 结 语

本文采用SBAS–InSAR技术对锦州采油厂进行时序分析，通过融合升降轨数据进行二维形变分解，获得垂直向与东西向形变结果，以较高的精度完成了对锦州采油厂地表沉降的监测。主要研究结论包括：

1）利用SBAS–InSAR技术分析了2017—2021年锦州采油厂的形变情况，其中升、降轨数据监测到的最大沉降速率分别为37.2、46.1 mm/a。

2）形变二维分解结果表明，锦州采油厂存在明显的水平位移，最大垂直沉降速率为50.9 mm/a，最大水平位移速率为26.0 mm/a。精度验证结果表明，基于多轨融合的二维形变分解能有效提高形变监测精度。

3）油藏储层压实机理与压实沉降模型模拟结果表明，InSAR观测结果与模型模拟结果较一致，验证了InSAR形变监测结果的可靠性，确定了储层压实与地表沉降的内在联系，对采油厂油气开采储层表征、沉降防治具有重要参考意义。

虽然二维形变分解技术提高了沉降监测精度，实现了二维沉降分析，但其无法捕捉南北向的形变特征，难以完整反映地表沉降的三维信息。此外，储层压实沉降模型无法及时获得准确的储层参数，限制了模型预测的准确性；开采过程中注采活动数据的缺失，阻碍了建立注采活动与油田沉降间具体联系的可能。因此，如何全面分析沉降的三维信息，并开发更精准的油田沉降模拟方法，是未来研究中需要进一步探索和解决的关键问题。

参考文献

[1] 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)：1 422-1 433

[2] Ogers A E，Ingalls R P. Venus：Mapping the Surface Reflectivity by Radar Interferometry[J]. Science，1969，165(3 895)：797-799

[3] Gabriel A K，Goldstein R M，Zebker H A. Mapping Small Elevation Changes over Large Areas：Differential Radar

（下转第46页）