



钟储汉, 任志鹏, 张双成, 等. 2026. 顾及 GNSS 大气改正的陆地碳封存 InSAR 形变监测研究. 地球物理学进展, 41 (1): 0095-0103, doi:10. 6038/pg2026JJ0046.

ZHONG ChuHan, REN ZhiPeng, ZHANG ShuangCheng, et al. 2026. InSAR deformation monitoring of carbon sequestration areas considering GNSS atmospheric correction. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41 (1): 0095-0103, doi:10. 6038/pg2026JJ0046.

顾及 GNSS 大气改正的陆地碳封存 InSAR 形变监测研究

InSAR deformation monitoring of carbon sequestration areas considering GNSS atmospheric correction

钟储汉¹, 任志鹏^{2*}, 张双成², 张雯缘¹, 李军², 叶志磊², 王波¹

ZHONG ChuHan¹, REN ZhiPeng^{2*}, ZHANG ShuangCheng², ZHANG WenYuan¹, LI Jun², YE ZhiLei², WANG Bo¹

1. 中石化石油工程设计有限公司, 东营 257026

2. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054

1. SINOPEC Petroleum Engineering Corporation, Dongying 257026, China

2. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

摘要 碳捕集、利用和封存 (Carbon Capture, Utilization and Storage) 已经成为减少大气中二氧化碳的一种有效方法, 但大量的二氧化碳注入地下可能会引起地表发生变形. 为了探究二氧化碳注入后注采区的地表变化情况, 本文基于 45 景 Sentinel-1A 升轨影像, 运用 SBAS-InSAR 技术对国内某 CO₂ 陆地封存实验区域进行为期两年半形变监测工作, 并构建了一种适用于小区域顾及 GNSS 的大气延迟改正模型. 根据结果显示, 本文提出的大气改正模型可以有效削减干涉图中的对流层延迟误差. 根据 InSAR 结果显示, 在注气过程中地表沿卫星视线方向靠近卫星, 即地表发生隆起现象. 通过提取注气井附近的形变时间序列, 转换到垂直方向与 GNSS 数据对比, 发现在注气之后, 地表先隆起, 几个月后开始逐渐回落. 综合分析来看, 结合 GNSS 与 InSAR 技术可以观测到该地区地表微小形变信息, GNSS 监测站不仅可以用于校正 InSAR 干涉图中的大气延迟误差, 还可以用于验证 InSAR 监测结果.

关键词 碳封存; 时序 InSAR; GNSS; 大气校正; 地表监测

中图分类号 P228

Abstract Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) has emerged as an effective strategy for mitigating atmospheric CO₂ emissions. However, the large-scale subsurface injection of CO₂ may induce ground surface deformation, potentially compromising the long-term integrity of CO₂ storage. To investigate surface displacement patterns in CCUS project areas following CO₂ injection, this study employed the Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar (SBAS-InSAR) technique to analyze 45 ascending Sentinel-1A images acquired between January 2022 and August 2024, enabling comprehensive deformation monitoring over a 2.5-year period in a Chinese CCUS geological storage site. Recognizing the impact of tropospheric delay errors on InSAR measurements, we developed an enhanced atmospheric delay correction approach synergizing Global Navigation Satellite System (GNSS) data and ERA5 reanalysis data, specifically optimized for small-scale regional applications. Analysis of the phase-unwrapped interferograms confirms that our GNSS-constrained atmospheric correction approach significantly reduces tropospheric delay artifacts in localized interferometric observations. The derived InSAR deformation field reveals distinct surface displacement patterns in the CO₂ injection zone, with measured vertical deformation rates ranging from 0 to 10 mm/a. Deformation time series analysis at monitoring points adjacent to injection wells reveals a consistent response: initial surface uplift immediately following CO₂ injection, followed by gradual subsidence after several months. This pattern was confirmed through comparative analysis of InSAR-derived vertical displacements (converted from LOS measurements) and

收稿日期 2025-04-28; 修回日期 2025-09-21.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 国家重点研发计划项目 (2022YFE0206800)、自然资源部陕西西安地裂缝与地面沉降野外科学观测研究站开放课题 (2022-04) 和陕西省地学大数据与地质灾害防控三秦学者创新团队项目 (2022) 联合资助.

第一作者简介 钟储汉, 男, 1971 年生, 硕士, 教授级高工, 主要研究方向为岩土工程勘察和地质灾害防治. E-mail: sjyzch@126.com

*** 通讯作者** 任志鹏, 男, 主要研究方向为 InSAR 技术用于地表微小形变监测研究. E-mail: renzhipeng97@163.com

文献标识码 A

doi:10. 6038/pg2026JJ0046

CSTR:32085.14.pg2026JJ0046

0 引 言

在全球变暖的背景下,碳中和是全世界正在努力实现的目标,碳捕集与封存(CCUS, Carbon Capture, Utilization and Storage)是指将二氧化碳(carbon dioxide, CO₂)从能源利用、工业过程中或大气中捕集分离,并输送到适宜的场地,加以利用或封存,以实现 CO₂ 长期封存或利用的过程. CCUS 作为一种减少大气中 CO₂ 的有效方法受到了广泛关注, CO₂ 驱油埋存作为 CCUS 技术体系的最终环节,大量的 CO₂ 注入地下可能会引起地表隆起,因此监测 CO₂ 有效埋存成为 CCUS 技术最后的关键(赵改善, 2023).

对于油藏区域已有人进行形变监测工作,对于 CCUS 中 CO₂ 地下埋存的安全性监测在国外早有开展(Yang *et al.*, 2015; Mathias *et al.*, 2009),主要是监测在 CO₂ 注入深层储层后因地下压力变化引起的地表变形,并跟踪 CO₂ 的羽流情况,对于国内 CCUS 项目区域也有多个区域开展(周银邦等, 2023),但对于运用时序 InSAR 进行注气前后地表形变监测反映注气变化的研究较少(Zhang *et al.*, 2021),这也是本实验开展的目的之一.

传统的地面监测手段有多种,通常具有较高的监测精度(张勤等, 2017)但是需要在研究区进行大规模测量作业或者安装大量设备,耗时耗力的同时还大大增加项目成本. 合成孔径雷达干涉测量(Interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术作为一种影像大地测量技术,可以在较低成本的条件下跟踪观测地表微小形变信息,其优势在于可以进行全天时、全天候、广覆盖以及高精度的地表变化观测作业(朱建军等, 2017). 随着当前 SAR 卫星不断发射以及 SAR 影像数据的积累,InSAR 技术在大范围长时空演化特征获取方面的优势愈发显现(葛大庆等, 2019),被广泛应用于地面沉降、滑坡、地震

independent GNSS observations. This study demonstrates that the synergistic use of GNSS and InSAR technologies enables precise monitoring of millimeter-scale surface deformation in CCUS operational areas. The GNSS infrastructure serves dual purposes: (1) enhancing InSAR measurement accuracy through tropospheric delay correction, and (2) providing independent validation of InSAR-derived deformation results. These findings underscore the critical importance of integrated geodetic monitoring for ensuring the safety and efficacy of CO₂ geological storage operations.
Keywords Carbon sequestration; Time-series InSAR; GNSS; Atmospheric correction; Surface monitoring

等灾害监测领域,并且已有实验证明这项技术的可靠性与精确性(许强等, 2019; 王霞迎等, 2018),但是 InSAR 技术对于大气延迟误差的控制一直是研究重点(李振洪等, 2023). 本文运用时序 InSAR 技术对国内某 CO₂ 陆地埋存注入区域进行为期 32 个月的监测工作,目的是揭示 CO₂ 注入前后地表发生的变化情况. 实验运用 Sentinel-1A 卫星采集的数据解算注入区的形变特征,并结合全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)技术对 InSAR 干涉图中大气延迟进行改正,最后基于时序 InSAR 解算的形变场,提取各井口的形变时序并与 GNSS 监测结果进行验证,分析在 CO₂ 注入前后的变化情况.

1 InSAR 解译地表形变基本原理

1.1 InSAR 技术基本原理

当 SAR(synthetic aperture radar)卫星经过同一个区域两次或多次后,将采集到的 SAR 影像进行复共轭相乘,提取目标区域的地形或者形变信息,几何关系如图 1 所示,干涉相位表达式为:

$$\varphi_{\text{int}} = \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{atmo}} + \varphi_{\text{noise}}, \tag{1}$$

其中 φ_{flat} 为平地相位; φ_{topo} 为地形相位; φ_{def} 为地表形变引起的相位; φ_{atmo} 为大气延迟相位; φ_{noise} 为噪声引起的相位. 将平地相位、地形相位、噪声相位、大气延迟相位去除,便可得到目标区域的地表形变信息,其中大气相位干扰较为明显且难以完全去除.

1.2 SBAS-InSAR 原理

小基线集差分干涉技术(Berardino *et al.*, 2002)是一种将单次观测结果作为观测值并基于最小二乘法则来获取高精度形变时间序列的 InSAR 分析方法,通过短基线 SAR 影像对组合生成干涉图合集,增加单个主影像条件下的干涉图数量,从而减小时空失相干对干涉图质量的影响. 经过一系列去噪声处理后,基于形变速率的最小二乘法则,通过应用奇

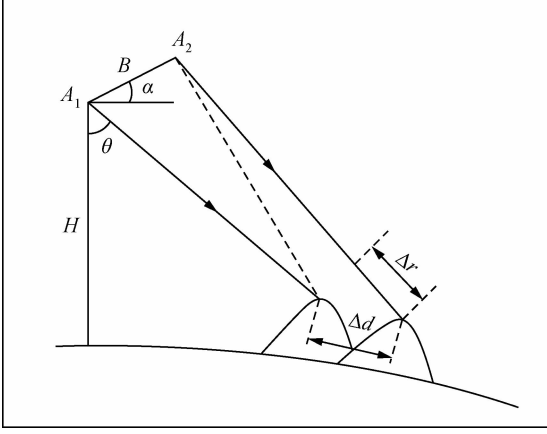


图1 差分干涉测量几何原理

Fig. 1 Geometric principles of differential interferometry

异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 方法获取相干目标的视线向形变速率和时间序列. 假设 $N+1$ 景影像, 生成 M 幅干涉图, 以线性形变速率来表示形变相位为:

$$\mathbf{v}^T = \left\{ \mathbf{v}_1^T = \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{t_1 - t_0}, \dots, \mathbf{v}_n^T = \frac{\varphi_n - \varphi_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \right\}, \varphi_0 = 0, \quad (2)$$

对于有 M 幅干涉图就可以组成一个方程组:

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{v} = \delta \varphi, \quad (3)$$

式中的 $\mathbf{B}$ 为 $M \times N$ 维矩阵, 对于第 i 行的各元素, $B(i, k) = t_k - t_{k-1}$. 如果 N 景影像组成 L 个子集, 那么方程组有无穷多个解, 在 SBAS 方法中可以通过奇异值分解法求得最小范数平差准则下的解. 差分干涉图中除形变相位以外还有其他一些相位, 可以在时间域和空间域内对残余相位进行滤波等处理分离大气延迟相位和非线性形变相位 (任志鹏等, 2023).

1.3 顾及 GNSS 的对流层延迟改正方法

天顶总延迟 (Zenith Total Delay, ZTD) 是由流体静力学延迟 (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD) 和湿延迟 (Zenith Wet Delay, ZWD) 两部分构成, ZTD 可通过 GNSS 数据处理得到, 而静力学延迟需要运用气象参数以及相关模型计算; 大气中所含的水汽由于时空变化特性较为复杂, 无法通过指定模型进行处理, 可以通过 GNSS 信号延迟来估计湿延迟与大气可降水汽量之间存在确定的函数关系. 静力学延迟采用 Saastamoinen 模型进行解算:

$$\text{ZHD} = 0.002277 \times \frac{P_s}{1 - 0.00266 \cos(2\varphi) - 0.00028H}, \quad (4)$$

式中, P_s 代表 GNSS 测站所处位置的地面气压, φ 代表纬度, H 代表测站的高度.

根据计算得到天顶静力学延迟 ZHD, 利用天顶对流层总延迟 ZTD 减去 ZHD, 便可以得到 ZWD 值. 使用欧洲中期天气预报中心 ERA5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis v5) 再分析输出产品提供的 0.25° 空间网格下每小时大气压水平的对流层参数计算. 估计对流层视距延迟样本是沿视距方向从地面一点到卫星的空气折射率的积分 (Cao et al., 2021), 可估计为:

$$\begin{aligned} \Delta L &= 10^{-6} \int_{s_k}^{s_{\text{top}}} N ds \\ &= 10^{-6} \int_{s_k}^{s_{\text{top}}} \left(k_1 \frac{P_d}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right) ds, \quad (5) \end{aligned}$$

其中 ΔL 为 LOS 方向对流层延迟, N 为空气折射率, P_d 和 e 分别为干空气和水蒸气的分压 (单位为 Pa), T 为温度 (单位为 K), 而 $k_1 = 0.776 \text{ K/Pa}$, $k_2 = 0.716 \text{ K/Pa}$ 和 $k_3 = 3.75 \text{ e}^3 \text{ K}^2/\text{Pa}$ 为经验常数. 通常, 根据其物理来源, 总延迟被认为是干分量和湿分量的总和 (Yu et al., 2018), 可描述为:

$$\Delta L_{\text{dry}} = 10^{-6} \int_{h_k}^{h_{\text{top}}} \frac{k_1 R_d}{g_m} P_{s_0} dh, \quad (6)$$

$$\Delta L_{\text{wet}} = 10^{-6} \int_{h_k}^{h_{\text{top}}} \left[\left(k_2 - \frac{R_d}{R_v} k_1 \right) \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right] dh, \quad (7)$$

式中, P_{s_0} 为零点处的总压, g_m 为 LOS 路径中心的局部重力, 其中, 干空气和水蒸气的比气体常数分别为 $R_d = 287.05 \text{ J/(kgK)}$, $R_v = 461.495 \text{ J/(kgK)}$.

ERA5 和 GNSS 估计的对流层延迟是使用指数函数对分层延迟进行建模, 通过对剩余延迟拟合插值构造延迟的湍流部分. 在模型中总延迟定义为:

$$\text{ZTD}_k = S(h_k) + T(\mathbf{x}_k) + \varepsilon_k, \quad (8)$$

式中, k 为 GNSS 和 ERA5 在 k 位置的综合 ZTD, T 为湍流分量, $\mathbf{x}_k$ 为局部中心坐标系下的站点坐标向量, S 为与高度 h 相关的分层分量, ε 为剩余未建模残差, 包括未建模的分层和湍流信号.

使用从 ERA5 的分层温度、压力和部分水蒸气压力集成的 ZTD, 以与 GNSS 延迟一致的方式分解分层和湍流分量. 基于 GNSS 实测 ZTD 运用多项式回归模型对 ZTD 进行校正, 之后估计 LOS 对流层在每个高度的参数 (温度、压力、和水汽分压). 计算 LOS 延迟的积分获得不同高度的延迟估计, 将延迟样本内插到与 InSAR 测量相似的分辨率. 为了生成 InSAR 干涉图对流层延迟结果, 使用最接近每个干

涉图的两个 SAR 图像采集时间的两个 ERA5 参数, 将后一景延迟相位与前一景延迟相位相减, 将 InSAR 干涉相位减去大气延迟相位便可得到 InSAR 干涉图对流层延迟校正相位.

2 数据处理

2.1 研究区概况

研究区内均为平地, 以农业用地为主, 主要研究区东西向宽约 50 km, 南北向宽 30 km, 各工作站之间采用高压常温液相输送, CO₂ 处于超临界状态, 通过在注入井口加压, 将液相高压 CO₂ 注入目标储层. 在输送环节建成超临界 CO₂ 长距离运输管道, CO₂ 驱油封存环节中, 形成高压混相驱油技术, 实现 CO₂ 的循环利用和全生命周期碳封存. 在监测环节, 建立天空地协同的监测体系, 保障项目安全进行.

2.2 数据来源

实验所用 SAR 影像如表 1 所示, Sentinel-1A 卫星由欧空局 2014 年发射, 重访周期 12 天, 工作波段为 C 波段, 成像模式为干涉宽幅 (Interferometric Wide swath, IW), 极化方式为 VV 与 VH 双极化, 实验运用 VV 极化, 轨道配置为升轨, 入射角 33.67°.

表 1 实验所用 SAR 数据
Table 1 SAR data used in the experiment

卫星	轨道配置	当地过境时间	时间
Sentinel-1 A (S1A)	升轨	10:05 (UTC)	2022-01—2024-05

ERA5 数据集是 ECMWF 提供的最新全球气象再分析资料. 该数据集提供了多种全球均匀分布的网格化气象数值产品, 包括大气大陆地和海洋气候变化的气象要素. 其空间分辨率为 0.25° × 0.25° (约为 30 km), 时间分辨率为 1 h, 提供全天 24 h 的气象要素产品.

本文还用到了 GNSS 数据, 该数据主要目的为监测 CO₂ 注入引起注气井附近区域微小形变, 本实验是运用高精度相对定位软件基线解算得到形变结果与全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 对流层延迟结果, 该方法采用载波相位双差观测组合定位方式, 可以消除接收机钟差和卫星钟差, 削弱卫星星历误差, 可以加快基线解算速度 (姜卫平和邹璇, 2008). 图 2 为 GNSS 监测站空间分布情况.

2.3 监测策略

为了更完整的获取石油开采和 CO₂ 注入区大

面积、完整的形变信息, 本实验运用 SBAS-InSAR 方法从 SAR 影像中提取形变信息, Sentinel-1A 影像监测周期为 2022 年 1 月到 2024 年 8 月, Sentinel-1 卫星时空基线如图 3 所示, 其中时间基线为 84 d, 空间基线为 220 m; 首先对 SAR 影像进行预处理, 运用轨道数据和外部数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 去除多普勒效应干涉图中的地形相位, 其次对干涉图进行一系列滤波解缠工作, 运用首次处理的干涉图进行基线精化. 然后运用精化后的基线再次进行干涉滤波解缠工作, 最后运用奇异值分解方法获得高精度的形变速率.

对于干涉图大气校正操作, 在干涉图进行解缠处理后进行, 本实验运用的 ERA5 产品时间分辨率为 1 h, 提供全天 24 h 的气象要素产品, 从最接近合成孔径雷达图像获取位置的壓力层中提取气压、温度、相对湿度和位势高等四个变量. 使用双线性插值法将各层的再分析参数插值到近地点, 以计算天顶对流层延迟并补偿接地点与大气层之间的高度差. 分别计算后一景图像和前一景图像的静力学延迟和湿延迟, 通过对高程方向进行积分, 可计算出 SAR 图像中每个像素在时间 t 处的大气延迟, 基于布设在实验区的 GNSS 站获得的大气延迟对 ERA5 获得的大气延迟进行校正, 以获得实验区域在更准确的对流层延迟, 用于差分改正相位解缠后的干涉图 (图 4).

3 结果与分析

3.1 顾及 GNSS 的对流层延迟改正结果

实验选取 2024-06-19—2024-07-01 干涉图进行对比研究, 结果如图 5 所示, 经过对比发现, 在主要研究区改正前后相位变化明显, 由于在大气校正时要保证水汽数据与 SAR 图像的分辨率相匹配, 对水汽数据进行了插值处理, 可能会引入相应误差, 对部分干涉图相位校正产生过校正问题, 导致部分干涉图相位标准差不合理增大, 后续计算中对此类干涉图进行了剔除, 图中黑色点为解缠点. 为了验证插值处理对大气湿延迟结果的影响, 在进行湿延迟插值处理时, 每次选择排除一个 GNSS 站点, 将该站点获取的 ZWD 结果作为真值对插值后的 ZWD 结果进行验证, 计算该站点的 RMSE 用于说明插值误差对结果的影响, 结果见表 2, 在依次使用 GNSS 站点验证插值结果中, 每次插值后 RMSE 结果均稳定在 0.017 m 附近.

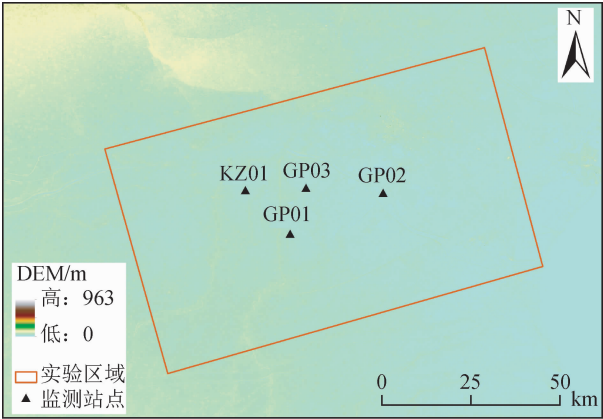


图2 GNSS 监测站空间分布情况

Fig.2 Spatial distribution of GNSS monitoring stations

表 2 插值精度分析

Table 2 Interpolation accuracy analysis

站点	RMSE
KZ01	0.0179
GP01	0.0163
GP02	0.0178
GP03	0.0168

实验选取校正前后干涉图计算标准差 (Standard Deviation,STD),大气校正前的干涉图 STD 为 1.07,对于校正后干涉图 STD 为 1.01,提升约 5%,干涉图校正结果如图 5 所示,该结果可以说明该方法对小区域干涉图大气校正的有效性.

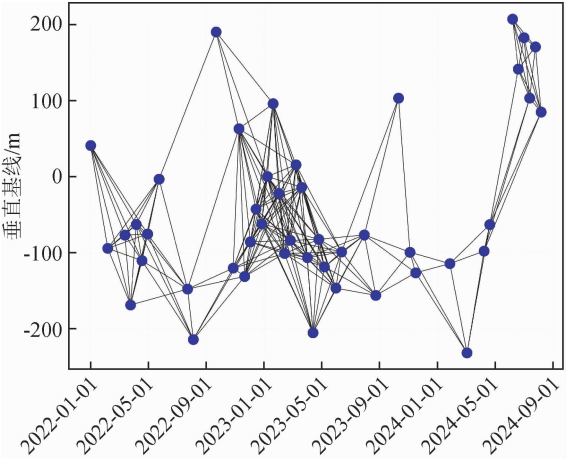


图3 Sentinel-1A 卫星时空基线图

Fig.3 Temporal-spatial baseline graph of Sentinel-1A satellite

3.2 时序 InSAR 形变监测结果

本实验运用 2022 年 1 月到 2024 年 8 月的 45 景 Sentinel-1A 升轨影像和 SBAS-InSAR 技术解算出该时间段内该区域的形变速率结果如图 6 所示. 所得形变速率结果是投影在 LOS 方向上,其中正值表示反射信号区域向靠近卫星的方向移动,负值表示向远离卫星的方向移动. 后续将以此为基础分析注气前后井口附近变化情况,并借助部分地面 GNSS 数据对两种结果进行验证.

在注采区的西南部为影像覆盖区域形变最大区域如图 7 所示,最大形变速率大于 50 mm/a,该区域为工业园区,初步推测是工业生产大量使用地下水,

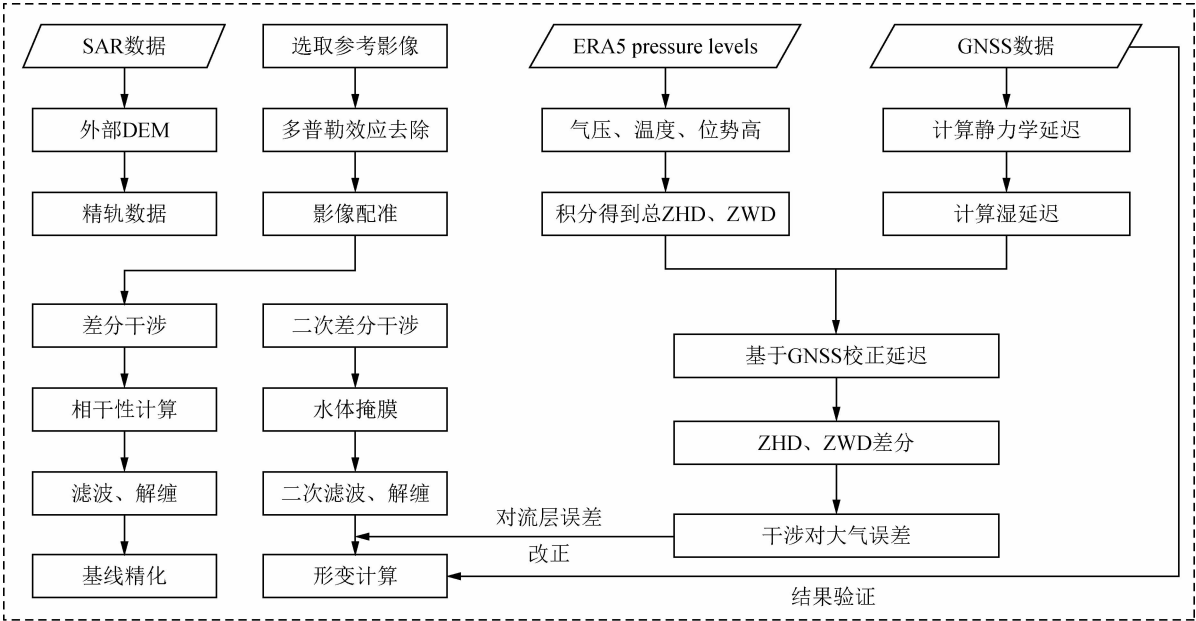


图4 数据处理流程

Fig.4 Data processing workflow

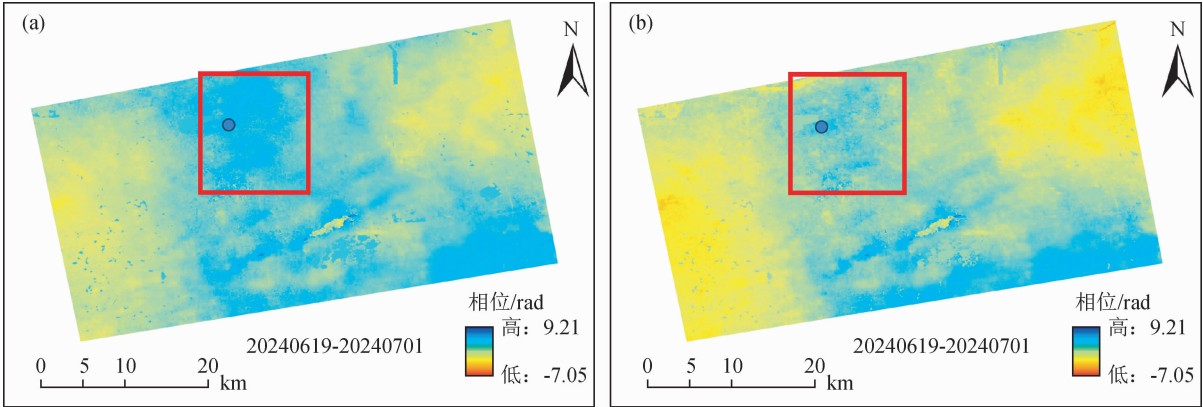


图 5 干涉图相位校正前后对比
(a)为校正前干涉图;(b)为校正后干涉图.

Fig. 5 Comparison of interferogram phase before and after correction
(a) Interferogram before correction; (b) Interferogram after correction.

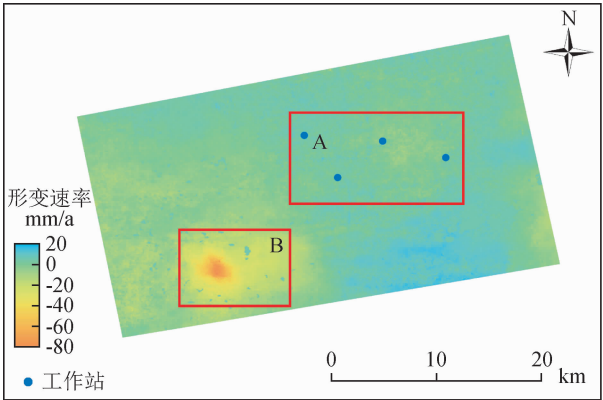


图 6 基于 Sentinel-1A 影像计算的 LOS 向形变
Fig. 6 LOS deformation calculated based on
Sentinel-1A imagery

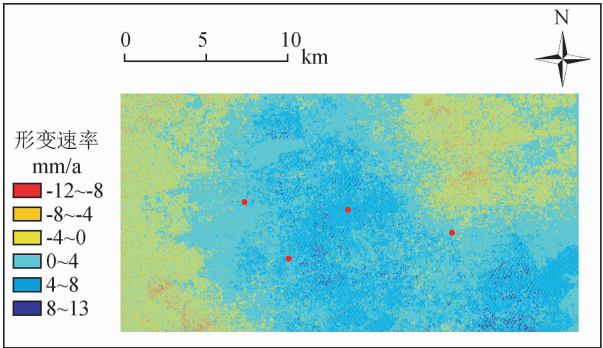


图 8 CO₂ 埋存区域形变速率
Fig. 8 Deformation rate of CO₂ storage zones

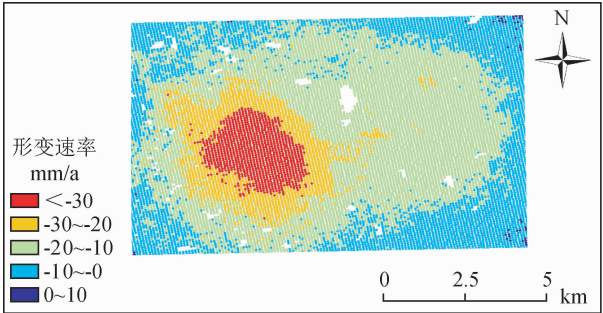


图 7 重点沉降区域形变速率
Fig. 7 Deformation rate of key subsidence areas

导致该区域地下水缺失,地下承压水层压缩.

石油开采与 CO₂ 埋存区域位于图中 A 区域,其中注入区域为红色矩形框内.从图 8 中可以看出,位

于石油开采区的形变速率介于 0 ~ 10 mm/a 之间,沿 LOS 方向表现出微小的抬升现象,这与常规的油田区形变有所不同,本文将在后续章节进行分析.

3.3 时序 InSAR 监测结果验证与规律分析

采用 SBAS-InSAR 技术进行数据处理,得到了该 CCUS 注气区 2022 年 1 月到 2024 年 8 月的形变速率,结果如图 9 所示,为了分析在注气前后井口附近的变化状况,因此选取具有代表性的注气井,提取各自井口的形变时序结果.从图中可以看出,井口附近地表均表现为沿 LOS 向靠近卫星方向的变化趋势,根据提供的现场资料显示,该区域在 2022 年下半年开始向地下油层注入 CO₂ 以达到提高采油率的效果,在 CO₂ 注入地下时,需要将 CO₂ 气体加压,使其成为超临界状态以便更高效率注入地下,这就导致在 CO₂ 注入地下后,会增大地下储层空间的压力,从而可能引起地表发生变化.

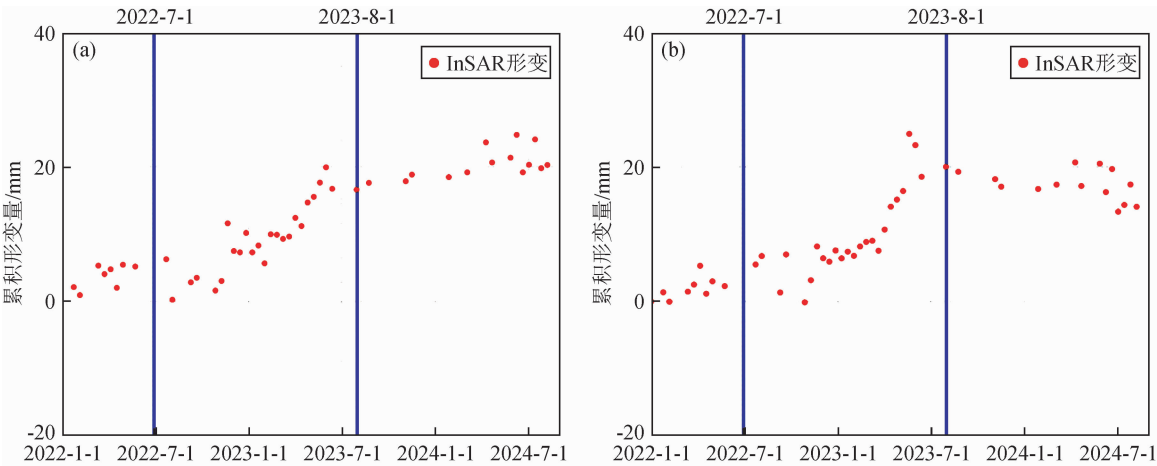


图 9 基于 S1 影像的时序结果
Fig. 9 Temporal results based on S1 imagery

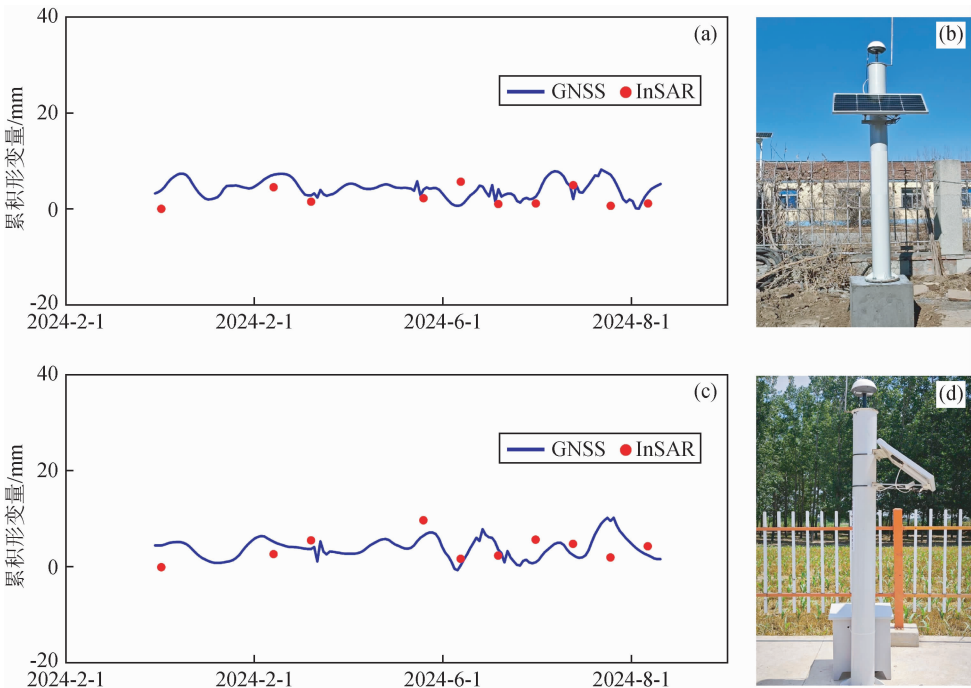


图 10 InSAR 与 GNSS 时序结果比较
Fig. 10 Comparison of InSAR and GNSS temporal results

本文将 InSAR 形变结果转换到垂直方向上,并与安装的 GNSS 监测结果进行比较验证,所得结果如图 10 所示. 两种形变结果均表现出相同的趋势,均有不同程度的向上隆起表现,从图中可以看出,在开始向地下注入 CO_2 后,地表会首先在注气井附近发生响应,在 InSAR 结果中表现为沿 LOS 方向向上变形,但变形程度缓慢微小不易监测到. 为了说明结果的可靠性,在注气站内安装有 GNSS 观测站,用于

实时监测注气井周围地表变化情况. 为了便于比较,将时序结果转换到竖直方向上,InSAR 技术对水平方向的测量有限,在这里假设地表的形变是垂直的,忽略水平方向的运动,其中 InSAR 结果转换用到了公式 (Bayramov *et al.*, 2022) :

$$d_{\text{vert(Up-Down)}} = d_{\text{LOS}} / \cos\theta, \tag{9}$$

其中, $d_{\text{vert(Up-Down)}}$ 为垂直方向位移, d_{LOS} 为雷达视线方向位移, θ 为当地入射角. 对于 GNSS 数据本文运用

了经验模态分解与小波变换组合降噪的方法对时间序列进行滤波降噪处理,首先对原始数据进行分解得到多个 IMF 分量,对高频的 IMF 分量进行小波变换从而得到小波阈值,其次对于高频 IMF 分量施加小波阈值降噪处理,对于低频的 IMF 分量则进行保留,最后,将去噪声后的高频信号与保留的低频信号进行重构得到更加可靠的信号(卢才武和夏峰, 2020;刘丹丹, 2021)。

将 InSAR 结果与 GNSS 解算结果进行比较,可以看出 InSAR 结果与 GNSS 在垂直方向上具有一致的变形趋势. 2023 年下半年开始,该项目进入管道运输 CO₂ 的阶段,向地下空间注入的 CO₂ 量显著增加,但地表对该变行没有立刻做出响应,直到 2024 年 2 月之后,两种 InSAR 结果均显示注气井附近的形变速率有明显变化,向上隆起的形变在逐渐增加. 因 GNSS 数据受限,直到 2024 年 3 月之后开始有连续数据,现有的 GNSS 数据也验证了上文所述观点,在 2024 年 2 月之后,地表形变速率加快,在 7 月之后又逐渐向下回落。

4 结 论

本文基于 45 景 Sentinel-1A 升轨数据,运用 SBAS-InSAR 技术对国内某 CO₂ 埋存实验进行 2022 年 1 月到 2024 年 8 月的形变监测工作,运用 GNSS 结合 ERA5 数据对 InSAR 干涉图中对流层延迟误差进行改正,最后获得该区域的形变速率图,提取注气井口的形变时序结果,与安装在注气井附近的 GNSS 观测站所得数据进行对比,探究在 CO₂ 注入地下后引起的地表变化规律. 结果表明:(1) 针对研究区域多变的水汽环境下,本文的顾及 GNSS 的小区域对流层延迟改正方法可以在一定程度上减弱 InSAR 干涉图中的对流层误差影响.(2) 在 2022 年 1 月到 2024 年 8 月期间,区域变形表现为沿着 LOS 向靠近卫星,通过分析井口附近地表的形变时间序列,与 GNSS 数据进行对比验证,发现地表在 2024 年 2 月后向上隆起,在 2024 年 7 月之后又逐渐向下回落。

总体上,运用时序 InSAR 结合 GNSS 技术对国内某 CO₂ 埋存实验进行的地表形变监测,可以观测到该区域的地表发生微小的向上抬升变化,随着项目的持续推进,这一变化在到达一定阶段后发生向下回落,通过在该陆地碳封存区域开展的实验可以证明,GNSS 监测站可以用于校正 InSAR 干涉图中的大气延迟误差,还可以用于验证 InSAR 监测结果. 观测结果表明对于 CO₂ 埋存区域的地表形变监

测工作是有必要的,后续也将持续对该区域进行更加精细化的监测工作。

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

- Bayramov E, Buchroithner M, Kada M, *et al.* 2022. Multi-temporal SAR interferometry for vertical displacement monitoring from space of tengiz oil reservoir using SENTINEL-1 and COSMO-SKYMED satellite missions. *Frontiers in Environmental Science*, 10: 783351, doi: 10.3389/fenvs.2022.783351.
- Berardino P, Fornaro G, Lanari R, *et al.* 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40 (11): 2375-2383, doi: 10.1109/TGRS. 2002. 803792.
- Cao Y M, Jónsson S, Li Z W. 2021. Advanced InSAR tropospheric corrections from global atmospheric models that incorporate spatial stochastic properties of the troposphere. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126 (5): e2020JB020952, doi: 10.1029/2020JB020952.
- Ge D Q, Dai K R, Guo Z C, *et al.* 2019. Early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies: thoughts and recommendations. *Geomatics and Information Science of Wuhan University (in Chinese)*, 44 (7): 949-956, doi: 10.13203/j. whugis20190094.
- Jiang W P, Zou X. 2008. On error of atmospheric models in GPS precise positioning. *Geomatics and Information Science of Wuhan University (in Chinese)*, 33 (11): 1106-1109, 1197, doi: 10.13203/j. whugis2008.11.008.
- Li Z H, Zhu W, Yu C, *et al.* 2023. Development status and trends of imaging geodesy. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica (in Chinese)*, 52 (11): 1805-1834, doi: 10.11947/j. AGCS. 2023. 20230003.
- Liu D D. 2021. New method of outlier detection for GNSS coordinate time series based on EMD approach. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 36 (5): 1865-1873, doi: 10.6038/pg2021FF0265.
- Lu C W, Xia F. 2020. Microseismic noise reduction based on EWT and Meyer adaptive threshold. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 35 (3): 1010-1016, doi: 10.6038/pg2020DD0244.
- Mathias S A, Hardisty P E, Trudell M R, *et al.* 2009. Approximate solutions for pressure buildup during CO₂ injection in brine aquifers. *Transport in Porous Media*, 79 (2): 265-284, doi: 10.1007/s11242-008-9316-7.
- Ren Z P, Zhang S C, Si J Z, *et al.* 2023. Deformation interpretation of expansive soil by combining SBAS-InSAR and CR-InSAR at Ankang airport. *Journal of Geodesy and Geodynamics (in Chinese)*, 43 (11): 1112-1116, 1128, doi: 10.14075/j. jgg. 2023. 11. 003.
- Wang X Y, Zhao C Y, Yin H F. 2018. Review: deformation time series method with InSAR techniques. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 33 (4): 1430-1437, doi: 10.6038/pg2018BB0278.
- Xu Q, Dong X J, Li W L. 2019. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards. *Geomatics and Information Science of Wuhan University (in Chinese)*, 44 (7): 957-966, doi: 10.13203/j. whugis20190088.
- Yang Q, Zhao W L, Dixon T H, *et al.* 2015. InSAR monitoring of ground deformation due to CO₂ injection at an enhanced oil recovery site, West Texas. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 41: 20-28, doi: 10.1016/j. ijggc. 2015. 06. 016.
- Yu C, Li Z H, Penna N T, *et al.* 2018. Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123 (10): 9202-9222, doi: 10.1029/2017JB015305.

Zhang Q, Huang G W, Yang C S. 2017. Precision space observation technique for geological hazard monitoring and early warning. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 46(10): 1300-1307, doi: 10.11947/j. AGCS. 2017. 20170453.

Zhang T, Zhang W C, Yang R Z, *et al.* 2021. CO₂ capture and storage monitoring based on remote sensing techniques: a review. *Journal of Cleaner Production*, 281: 124409, doi: 10.1016/j. jclepro. 2020. 124409.

Zhao G S. 2023. Geophysical monitoring for geological carbon sequestration: present status, challenges, and future development. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 62(2): 194-211, doi: 10.3969/j. issn.1000-1441. 2023. 02. 002.

Zhou Y B, Wang R, He Y F, *et al.* 2023. Analysis and comparison of typical cases of CO₂ geological storage in saline aquifer. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency* (in Chinese), 30(2): 162-167, doi: 10.13673/j. cnki. cn37-1359/te. 202201028.

Zhu J J, Li Z W, Hu J. 2017. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 46(10): 1717-1733, doi: 10.11947/j. AGCS. 2017. 20170350.

附中文参考文献

葛大庆, 戴可人, 郭兆成, 等. 2019. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议. *武汉大学学报(信息科学版)*, 44(7): 949-956, doi: 10.13203/j. whugis20190094.

姜卫平, 邹璇. 2008. 精密 GPS 定位中大气模型误差的研究与分析. *武汉大学学报(信息科学版)*, 33(11): 1106-1109, 1197, doi: 10.13203/j. whugis2008. 11. 008.

李振洪, 朱武, 余琛, 等. 2023. 影像大地测量学发展现状与趋势. *测绘学报*, 52(11): 1805-1834, doi: 10.11947/j. AGCS. 2023.

20230003.

刘丹丹. 2021. 基于 EMD 的 GNSS 时间序列异常值探测算法. *地球物理学进展*, 36(5): 1865-1873, doi: 10.6038/pg2021FF0265.

卢才武, 夏峰. 2020. 基于 EWT 和 Meyer 自适应阈值的微震降噪. *地球物理学进展*, 35(3): 1010-1016, doi: 10.6038/pg2020DD0244.

任志鹏, 张双成, 司锦钊, 等. 2023. 综合 SBAS-InSAR 与 CR-InSAR 解译安康膨胀土机场形变. *大地测量与地球动力学*, 43(11): 1112-1116, 1128, doi: 10.14075/j. jgg. 2023. 11. 003.

王霞迎, 赵超英, 尹慧芳. 2018. 地表形变时间序列 InSAR 监测法综述. *地球物理学进展*, 33(4): 1430-1437, doi: 10.6038/pg2018BB0278.

许强, 董秀军, 李为乐. 2019. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警. *武汉大学学报(信息科学版)*, 44(7): 957-966, doi: 10.13203/j. whugis20190088.

张勤, 黄观文, 杨成生. 2017. 地质灾害监测预警中的精密空间对地观测技术. *测绘学报*, 46(10): 1300-1307, doi: 10.11947/j. AGCS. 2017. 20170453.

赵改善. 2023. 二氧化碳地质封存地球物理监测: 现状、挑战与未来发展. *石油物探*, 62(2): 194-211, doi: 10.3969/j. issn. 1000-1441. 2023. 02. 002.

周银邦, 王锐, 何应付, 等. 2023. 咸水层 CO₂ 地质封存典型案例分析及对比. *油气地质与采收率*, 30(2): 162-167, doi: 10.13673/j. cnki. cn37-1359/te. 202201028.

朱建军, 李志伟, 胡俊. 2017. InSAR 变形监测方法与研究进展. *测绘学报*, 46(10): 1717-1733, doi: 10.11947/j. AGCS. 2017. 20170350.