

盐穴储气库地表形变FS-InSAR精细反演与时空演化特征分析

张嘉骥^{1,2}, 吴宏安^{1,2}, 刘真真³, 张永红², 王紫钰³,
康永辉^{1,2}, 魏钜杰²

1. 辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 阜新 123000;

2. 中国测绘科学研究院, 北京 100036;

3. 中国石油工程建设有限公司华北分公司, 沧州 062550

摘要: 中国天然气供需矛盾突出、调峰需求大, 地下储气库已成为保障供气稳定的关键基础设施。然而, 盐穴型储气库高压环境下的盐岩蠕变会引发显著地表形变, 严重威胁储气库安全生产。因此, 精细获取储气库地表形变信息, 是保障其安全稳定运行的重要前提。本文基于全散射体 InSAR (FS-InSAR) 技术, 利用 79 期 Sentinel-1 时序雷达影像, 精细反演了某盐穴型储气库 2021 年 8 月—2024 年 8 月的地表形变场, 分析了储气库的形变空间分布差异, 并结合注采气数据对比分析了储气库形变的时序演化特征。结果表明, FS-InSAR 技术可获取水域、农田等分布较多的储气库区域高精度高密度的地表形变信息, 实验监测密度达 1121 个点/km², 实现了除水体之外的全像素地表形变监测。28 个水准数据验证显示, InSAR 地表形变结果与水准测量的差值标准差为 2.9 mm/a。该储气库不同区域呈现差异化地表形变特征, 老腔区域发育一定程度的地面沉降, 最大沉降速率达 82 mm/a; 新腔区域沉降相对较小, 沉降速率多为 10—20 mm/a, 这可能与新腔采用天然气阻溶回溶、氮气阻溶水溶等先进造腔技术有关。时序上, 地表形变呈显著周期性, 与注采气活动高度相关, 即注气阶段地表抬升, 采气阶段下沉。本研究为储气库全域高风险形变区域的早期识别提供了重要参考, 将有助于储气库注采气的科学调度与管理。

关键词: 合成孔径雷达干涉测量, 全散射体, 盐穴储气库, 地表形变, 注采气

中图分类号: P2

引用格式: 张嘉骥, 吴宏安, 刘真真, 张永红, 王紫钰, 康永辉, 魏钜杰. 2026. 盐穴储气库地表形变FS-InSAR精细反演与时空演化特征分析. 遥感学报, 30(4): 1075–1083

Zhang J J, Wu H G, Liu Z Z, Zhang Y H, Wang Z Y, Kang Y H and Wei J J. 2026. Fine mapping and spatiotemporal evolution analysis of ground deformation in salt cavern gas storage using the FS-InSAR technique. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 1075–1083 [DOI: 10.11834/jrs.20255256]

1 引言

天然气是工业生产和居民生活的重要能源。为了调节供需矛盾, 全球各国积极探索地下储气库建设。储气库已成为各国战略能源储备体系的重要组成部分。随着能源消费结构的深度调整, 中国天然气供需矛盾冲突, 季节性调峰需求显著。近年来, 中国已陆续建成涵盖枯竭油气藏、含水

层及盐穴等多种类型的地下储气库群, 为保障国家能源安全奠定了坚实基础。

与其他类型储气库相比, 盐穴型储气库具有调峰系数高、短期吞吐量大、垫底气低可完全回收等优点 (完颜祺琪 等, 2020), 自 2001 年以来, 中国已建成投产金坛储气库、江汉储气库和张兴储气库, 此外还有多个储气库正在建设中或已开展前期研究 (姚威和肖恩山, 2024)。然而, 由于

收稿日期: 2025-07-15; 预印本: 2025-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42274047); 国家重点研发计划(编号: 2023YFC3007202); 自然资源部科技计划项目(编号: A2520); 中国测绘科学研究院基本科研业务费(编号: AR2408, AR2509)

第一作者简介: 张嘉骥, 研究方向为卫星 InSAR 地表形变监测技术。E-mail: 862280927@qq.com

通信作者简介: 吴宏安, 研究方向为卫星 InSAR 高精度地表形变监测技术与应用。E-mail: wuha@casm.ac.cn

盐层在高压作用下具有塑性形变的特点, 长期注采作业引发的盐岩蠕变效应容易导致腔体变形、坍塌等风险, 直接威胁储气库安全生产(丁国生, 2007; 李银平等, 2012)。因此, 精细获取储气库的地表形变信息, 已成为实现盐穴型储气库安全状态动态评估与风险防控的重要前提。

传统的地表形变监测手段主要有精密水准测量(杜钊锋等, 2025)、全球导航卫星系统 GNSS (Global Navigation Satellite System)(万玮等, 2016)、测量机器人(梅文胜等, 2002)等。这些方法虽然有着测量精度高的优势, 但是经济成本和时间成本均较高, 且测量点位稀疏, 难以实现大面积连续监测。随着雷达遥感技术的逐渐发展, 合成孔径干涉雷达测量 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技术为地表形变监测提供了大范围、高分辨的全新监测手段。为了提升地表形变监测精度, 研究人员在常规 InSAR 技术的基础上进一步提出了时序 InSAR 技术, 如永久散射体 PS (Persistent Scatterer) InSAR (Ferretti 等, 2001)、小基线集 SBAS (Small Baseline Subsets) InSAR (Berardino 等, 2002)、分布式散射体 DS (Distributed Scatterer) InSAR (Ferretti 等, 2011) 以及全散射体 FS (Full Scatterer) InSAR (Wu 等, 2024; 吴宏安等, 2024), 已广泛应用于地面沉降、滑坡、采空区、冰川、重要基础设施等各类地表形变监测。

在储气库地表形变监测方面, 国内外学者利用时序 InSAR 技术对不同类型的储气库开展了有益探索。Teatini 等(2011)利用 PS-InSAR 技术对意大利北部的 Lombardia 枯竭油气藏地下储气库开展了形变监测, 并从地质力学角度分析了地下储气和封存对地表形变的影响。Fibbi 等(2023)利用 PS-InSAR 技术获取了西班牙中部的 Uelsen 含水层型储气库 2020 年—2021 年的地表形变信息, 结果阐明了天然气开采和注入与地表形变之间的关系。Fibbi 等(2025)利用 MT-InSAR 技术对德国萨克森州的 Yela 盐穴型储气库、德国北部 Rehden 枯竭气藏型储气库群等不同类型的储气库开展了地表形变监测, 结果表明不同类型的储气库在地表形变方面有着明显的差异。在国内, 陈威等(2016)对呼图壁枯竭气藏型储气库利用 SBAS-InSAR 技术开展了形变监测, 采用多点源 Mogi 模型模拟了形变场。王泽根等(2022)利用 SBAS-

InSAR 技术, 对呼图壁储气库开展了地表形变监测, 并进行了形变机理研究。总体来看, 国内针对中国规模最大的新疆呼图壁枯竭气藏型储气库的时序 InSAR 形变监测研究较多, 而针对于其他类型的储气库研究相对较少。

本文以中国某盐穴型储气库作为研究区, 考虑到研究区内农田较多且水网密集, 容易造成 InSAR 干涉图相干性较低, 此外由于水汽浓度较高, 大气延迟效应也更为严重, 使得传统的时序 InSAR 方法难以获取高精度高密度的地表形变信息。为此, 本文基于最新的 FS-InSAR 技术, 利用其良好的大气效应改正、高程误差改正以及低相干相位恢复等性能, 获取研究区全分辨率精细化地表形变信息, 并开展地表形变的时空演化特征分析, 以期为该储气库的安全运营提供科学数据支撑。

2 研究区与实验数据

研究区位于中国某盐矿区, 该矿区面积 60.5 km^2 , 矿石储量 $162.42 \times 10^8 \text{ t}$, 盐层顶面埋深 $850\text{—}1100 \text{ m}$, 厚度 $67.85\text{—}230.95 \text{ m}$ 。从第一口盐井开始采盐, 到现在积累了大量的老腔。该储气库通过调节季节性用气需求, 保障能源供应安全, 承担周边地区天然气调峰、应急储备功能。

利用欧洲航天局 Sentinel-1 卫星 2021-08-10—2024-08-24 获取的 79 期升轨雷达影像开展研究区形变监测。影像采用干涉幅宽 IW (Interferometric Wide) 模式, 幅宽为 250 km , 波长为 5.56 cm 的 C 波段, 空间分辨率为方位向 $5 \text{ m} \times$ 距离向 20 m , VV 极化。该卫星具有高时间分辨率优势, 重访周期为 12 d 。图 1 为研究区的 SAR 影像的平均振幅和平均相干系数, 面积约为 $4.6 \times 3.7 = 17.0 \text{ km}^2$ 。可以看到, 研究区内农田较多、建筑物较少, 且水网密集、水汽浓度大, 容易造成 InSAR 干涉图相干性较低、大气效应严重等干扰, 不利于获取高精度高密度的地表形变信息。

在 InSAR 处理过程中, 采用 30 m 分辨率的开源 CopDEM GLO-30 数据模拟和去除地形变相位。该 DEM 由 TerraSAR/TanDEM-X 两颗雷达卫星采集数据生产。采用精密轨道数据去除轨道误差相位带来的影响。此外, 收集了研究区 28 个水准点的逐年测量数据, 用于验证 InSAR 地表形变监测结果的精度。

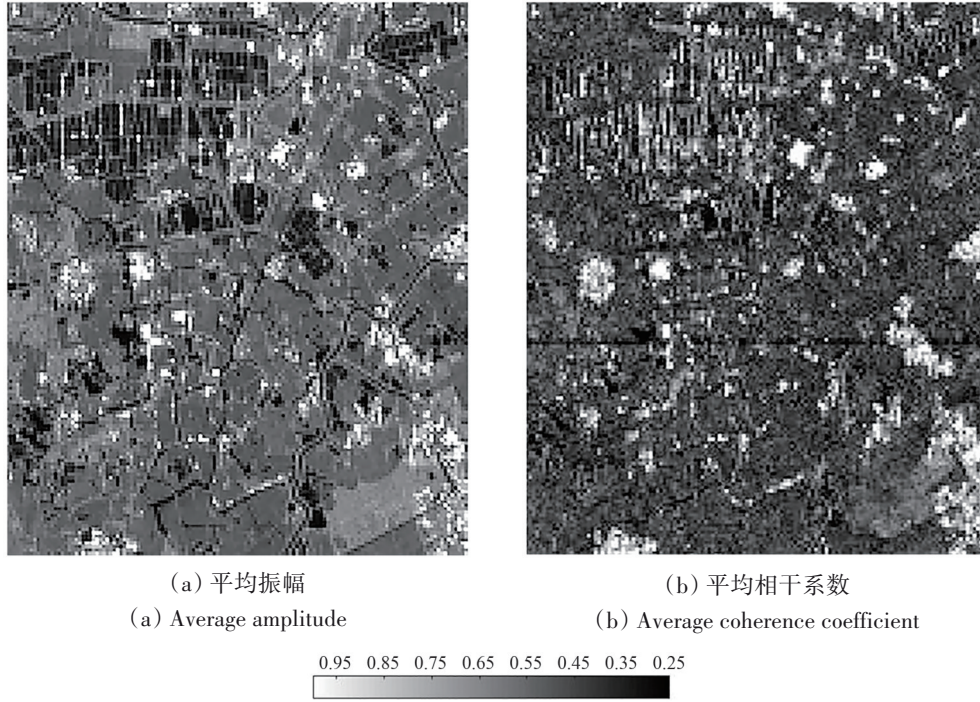


图1 研究区SAR影像平均振幅与平均相干系数

Fig. 1 Average amplitude and average coherence coefficient map of SAR images over the study area

3 研究方法和数据处理

3.1 FS-InSAR 基本原理

FS-InSAR技术充分利用了差分干涉图不同贡献相位的时域频谱特征,其中高频相位主要包括大气延迟相位、高程误差相位、轨道误差相位、噪声相位等成分,低频相位主要为形变相位。通过构建双尺度时域低通滤波器,将形变相位与其他相位有效分离,从而大幅提高干涉相位质量,实现除水体和高植被区之外的全像素覆盖。

FS-InSAR技术的主要流程包括以下步骤(Wu等, 2024): (1) SAR成像时刻相位生成: 基于小基线干涉组合原则,生成差分干涉图。利用Goldstein滤波方法对干涉图滤波抑制相位噪声(Goldstein和Werner, 1998),并采用最小费用流方法进行相位解缠(Eineder等, 1998)。在相位解缠过程中,对于局部低相干像元,通过空间内插方式恢复其相位信息。此外,对于部分干涉图出现的解缠错误,可采用相位闭合环方法进行探测与改正(Liu等, 2025)。最后,以第1景影像为参考,采用最小二乘方法计算出其他影像对应的解缠相位。(2) 双尺度时域低通滤波: 地表形变相位主要表现为时域低频、其他相位成分主要表现为

为时域高频。利用这一特征,构建双尺度时域低通滤波器将形变相位与其他相位分离。首先,利用小尺度时间窗口对SAR时序解缠相位进行低通滤波,得到一次低频相位:

$$\phi_{lpt_1}(t_x) = \sum_{u=1}^N \phi(t_u) G(t_u - t_x) \quad (1)$$

$$G(t_u - t_x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} T_{win_1}} e^{-\frac{(t_u - t_x)^2}{2T_{win_1}^2}} \quad (2)$$

式中, t_u 为 N 幅 SAR 影像的成像日期; t_x 为待滤波影像的日期; $\phi(t_u)$ 为时序解缠相位, $G(\cdot)$ 为高斯函数, T_{win_1} 为小尺度时间窗口大小。滤波后的一次低频相位将以形变相位为主,同时还含有少量残余相位,如轨道误差相位等。

将一次低频相位从时序相位中去除,得到一次高频相位。该相位主要包括大气相位、高程误差相位,噪声相位以及少量的高频形变相位。为了提取这部分形变信息,采用大尺度时间窗口,对一次高频相位再次进行滤波处理,得到二次低频相位:

$$\phi_{lpt_2}(t_x) = \sum_{u=1}^N \phi_{hpt_1}(t_u) G(t_u - t_x) \quad (3)$$

$$G(t_u - t_x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} T_{win_2}} e^{-\frac{(t_u - t_x)^2}{2T_{win_2}^2}} \quad (4)$$

式中, T_{win_2} 为大尺度滤波窗口大小。经过两次滤

波之后, 将一次与二次低频相位相叠加, 得到最终的时序低频相位:

$$\phi_{lp}(t_x) = \phi_{lp1}(t_x) + \phi_{lp2}(t_x) \quad (5)$$

(3) 差分低频相位生成与全散射体提取: 基于上述得到的时序低频相位, 再次干涉像对组合, 可生成差分低频相位, 该相位主要为地表形变相位, 大气延迟相位和噪声相位已基本消除。因此, 除水体和高植被区外, 任何一个像元都可以被视为高信噪比像元, 即全散射体 (FS), 从而实现高密度精细化监测。

(4) 地表形变反演: 基于全散射体的差分低频相位, 利用常规的时序 InSAR 方法可反演得到研究区的视线向地表形变结果, 包括平均地表形变速率和累计形变量。为了便于与水准数据对比, 假定研究区无水平向形变, 利用下式将视线向形变转换到垂直向形变:

$$d_{u-d}(x, y) = d_{LOS}(x, y) / \cos \theta_{(x, y)} \quad (6)$$

式中, $d_{u-d}(x, y)$ 与 $d_{LOS}(x, y)$ 分别表示点目标 (x, y) 的垂直向形变和视线向形变, $\theta_{(x, y)}$ 为雷达入射角。

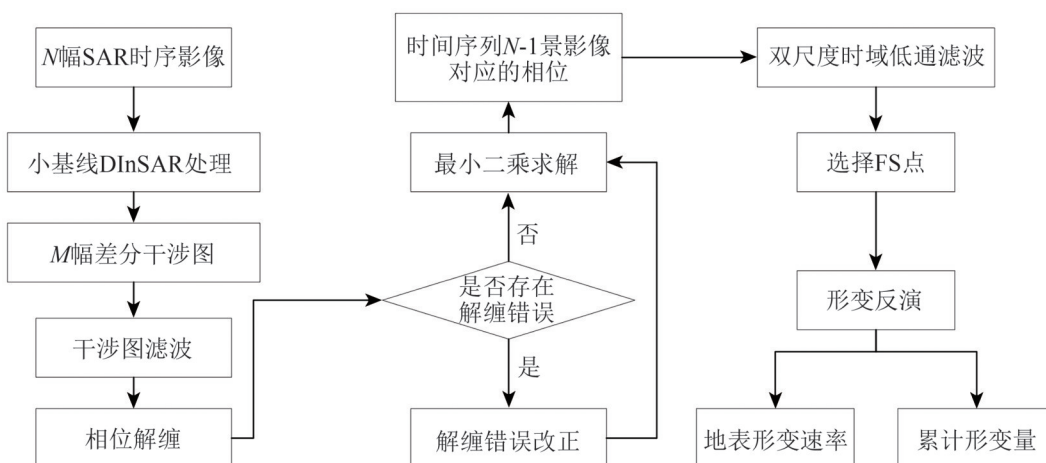


图2 FS-InSAR 技术流程图

Fig. 2 Flowchart of FS-InSAR technology

3.2 FS-InSAR 数据处理

Sentinel-1 的重访周期为 12 d, 为了使干涉图具有较高的相干性, 将最大时间阈值设为 36 d。由于 2023-06-13—2023-07-31 两期影像相隔 48 d, 将其单独连接, 一共生成了 144 个干涉对, 其时空基线分布如图 3 所示。采用 InSAR 地表形变监测软件 GDEMSI 生成相应的 144 幅差分干涉图, 其中设置方位向视数为 2, 距离向视数为 8。为了抑制噪声, 对差分干涉图进行 Goldstein 滤波处理, 滤波系数设为 0.75, 滤波窗口大小设为 32。使用最小费用流 MCF 方法对干涉图进行相位解缠, 相干系数掩膜阈值设置为 0.4。以第一期影像 20210810 作为参考, 通过最小二乘方法算出其余 78 期影像的相位。通过设计的双尺度时域低通滤波器对时序解缠相位进行滤波处理, 参考 Wu 等 (2024) 的模拟实验结果, 小尺度窗口设为 36 d, 大尺度窗口设为 72 d。基于干涉像对组合, 对时序低频相位再次

差分, 生成 144 幅差分低频相位, 用于地表形变反演。为了实现精细监测, 设置平均振幅阈值为 0.5, 提取了除水体之外的所有像元, 共计 19331 个。

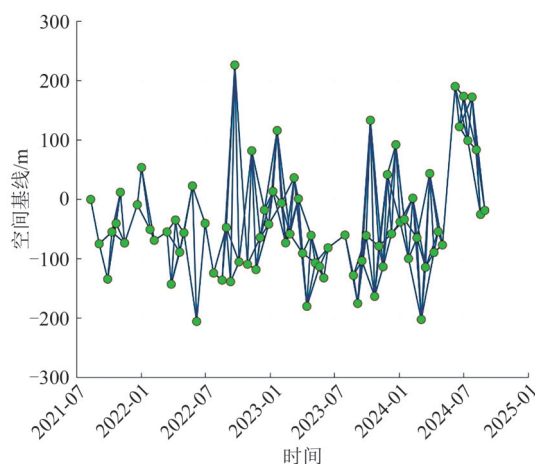


图3 144 幅干涉图的时空基线分布

Fig. 3 The spatio-temporal baseline distribution of 144 interferograms

4 结果与分析

4.1 研究区地表形变空间分布特征

利用FS-InSAR技术对研究区Sentinel-1雷达影像进行处理,获取了2021年8月—2024年8月研究区的超高密度地表形变信息,最终的监测点目标数量为19052个,监测密度为1121个点/ km^2 ,基本实现了除水域之外的全像素形变监测。图4为研究区的2021年8月—2024年8月平均地表形变速率,其中负值表示地表远离卫星即沉降,正值则代表抬升。可以看到,不同区域呈现出差异化的地表形变特征。老腔区域(虚框I)发育一定程度的地面沉降,且沉降中心呈规则漏斗状,沉降速率大多超过20 mm/a,最大沉降速率达82 mm/a。与新腔相比,新腔区域(虚框II)的地面沉降相对较小,沉降速率大多为10—20 mm/a。这一差异可能与新老腔采取的不同施工工艺密切相关。老腔大多建设较早,当时水溶造腔技术经验不足,易出现腔体畸形、偏溶等问题,不同深度腔体直径差异较大,容易导致盐层围岩受力不均。新腔采用天然气阻溶回溶、氮气阻溶水溶等先进造腔技术,可有效控制腔体形状,使其更接近理想的圆柱形,减少了应力集中,稳定性更好。同时,新腔设计更注重井间距和矿柱稳定性,避免因矿柱过窄导致腔体相互影响。

此外,该研究区盐岩属于层状盐岩,盐层与非盐夹层(如泥岩、石膏岩)呈韵律分布。老腔可能位于夹层较多、盐岩纯度较低的区域,这些夹层力学性能差,易在长期应力作用下发生塑性变形。而新腔优先选择盐岩纯度高、夹层少的区域,进一步降低了沉降风险。

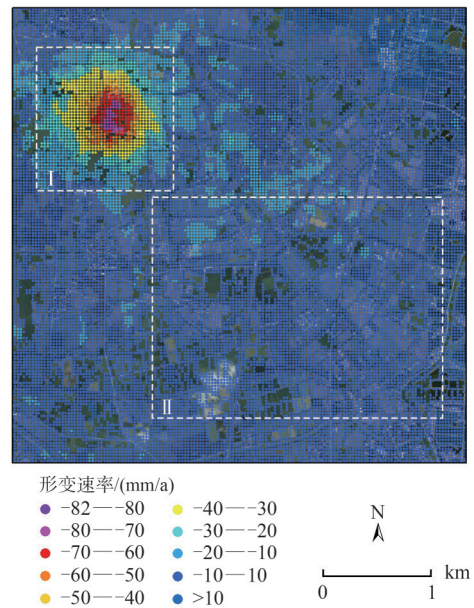
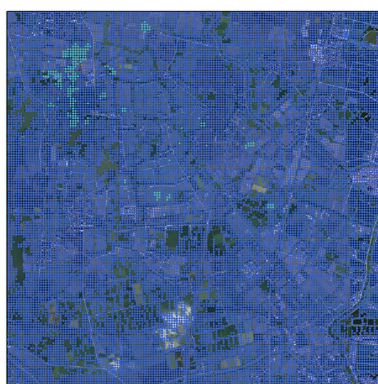


图4 2021年8月—2024年8月研究区平均地表形变速率
Fig. 4 Average deformation rate of the study area from August 2021 to August 2024

4.2 研究区地表形变时序演化特征

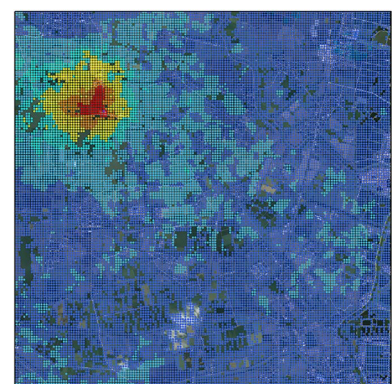
为进一步揭示该研究区地表形变的时序演化特征,利用FS-InSAR技术,获取了研究区累计沉降量。图5为研究区2021-08-10—2024-08-30每隔半年的时序累计沉降量,时段分别为2021-08-10—2022-02-06、2021-08-10—2022-08-17、2021-08-10—2023-02-01、2021-08-10—2023-08-24、2021-08-10—2024-02-08、2021-08-10—2024-08-30。可以看到,累计沉降量随时间逐渐增加,规律较为明显,老腔区地面沉降快速发展,3年最大累计沉降量达到266 mm;新腔区地面沉降发展较慢,3年累计沉降量大多不超过50 mm。



(a) 2021-08-10—2022-02-06



(b) 2021-08-10—2022-08-17



(c) 2021-08-10—2023-02-01

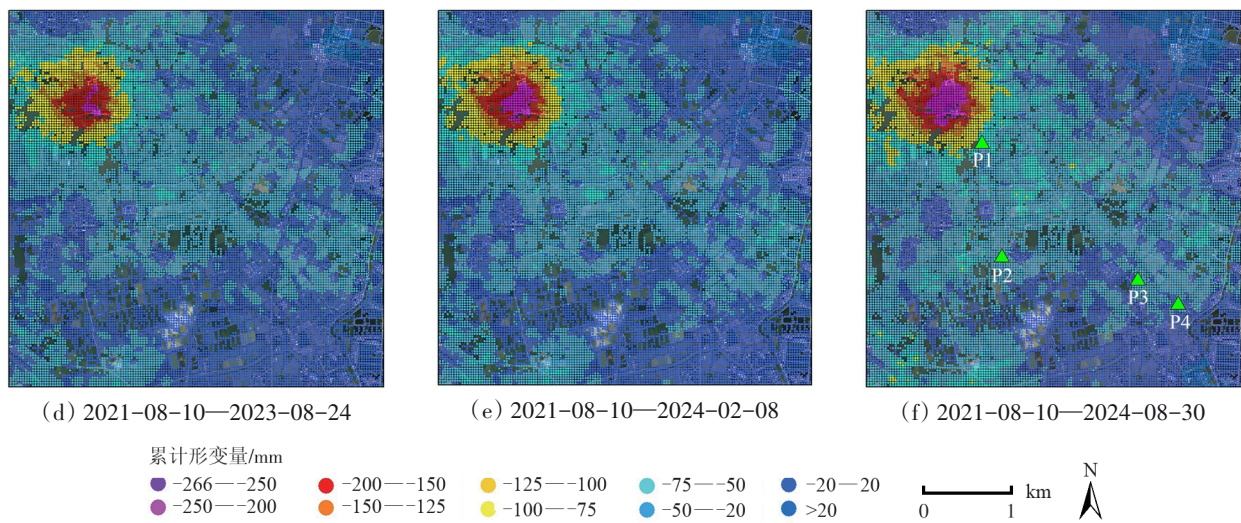


图5 2021年8月—2024年8月研究区时序累计形变量
Fig. 5 Cumulative deformation of the study area in time series from August 2021 to August 2024

为了分析研究区注采气活动与地表形变之间的关系，收集了2021年—2024年的注采气时段数据。由于InSAR获取的累计形变量包含线性形变及非线性形变两个部分，选择非线性形变开展对比分析，以更清晰反映时序形变与注采气时段的对应关系。选取4个InSAR监测点P1—P4，其中P1位于老腔区域，P2—P4位于新腔区域（图5绿色三角形），绘制其非线性形变量曲线及注采气时段，如图6所示。图6中橙色表示注气时段，蓝色表示采气时段。

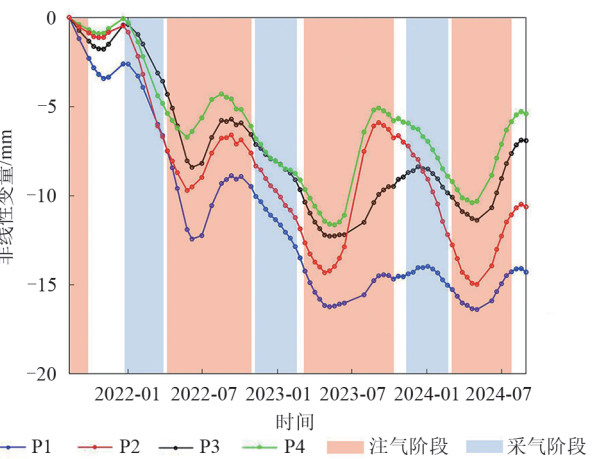


图6 4个InSAR监测点非线性形变时序曲线与注采气时段对比
Fig. 6 Comparison between time-series curves of nonlinear deformation at four InSAR points and gas injection-production periods

可以看到，地表非线性形变呈现明显的周期性变化特征，且与注采气活动有很大的关联性，

即在注气阶段主要表现为抬升，在采气阶段则主要表现为沉降。具体体现为，在每年的11月到次年2—3月（冬季），气温较低，天然气用量增加，为采气阶段，储层孔隙压力释放，岩石骨架发生弹性回缩，导致地表沉降。相反，从3—10月，一般为注气阶段，由于储层孔隙压力升高，岩石骨架发生弹性膨胀，导致地表总体呈抬升趋势。进一步分析显示，当采气停止后，地表沉降并不会立即停止，而会继续沉降一段时间，滞后期约为60 d。在注气阶段，大致可分为前中后3个时期，前期45 d左右受采气影响，地表持续沉降；此后90 d左右（中期）持续抬升，直至达到最大抬升值；后期受注气量逐渐减小的影响，普遍出现下沉现象，具体原因有待结合腔体地层数据开展深入分析。值得注意的是，由于在InSAR监测之前的19 d（2021-07-22—2021-08-09），研究区一直处于采气状态，且采气量较大，导致InSAR监测初期地面持续下沉。

4.3 精度验证

利用研究区28个水准点的逐年测量数据，分别验证FS-InSAR获取的平均地表形变速率和时序累计形变量。首先，基于28个水准点的逐年测量数据计算各点2021年8月—2024年8月的平均形变速率；然后以水准点为中心，根据最邻近原则，选取80 m半径内最近InSAR监测点，对比二者的

形变速率。图7显示了28个水准点及其邻近InSAR点形变速率的对比,其中红线为水准实测值,蓝线为InSAR形变值。可以看出,两种形变结果的趋势总体一致,二者差值的最大值为7.3 mm/a,最小值为0.5 mm/a,标准差为2.9 mm/a。

此外,利用水准逐年测量数据对时序累计沉降量进行了对比验证。图8为监测时段2021年8月—2024年8月的6个水准点的实测形变值与其最邻近InSAR点目标的累计沉降量时序曲线对比。可以看出,两者形变趋势基本一致,形变量差值大多不超5 mm。验证结果表明,FS-InSAR不仅可以获取研究区高精度的地表形变速率,也可以得到可靠的时序累计形变量。

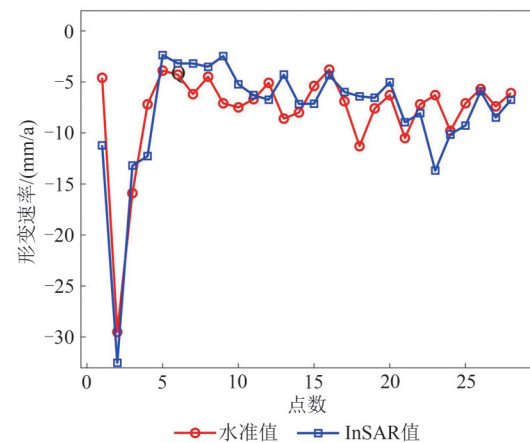


图7 研究区28个水准点形变速率与InSAR形变速率对比
Fig. 7 Comparison of deformation rates between 28 leveling points and InSAR in the study area

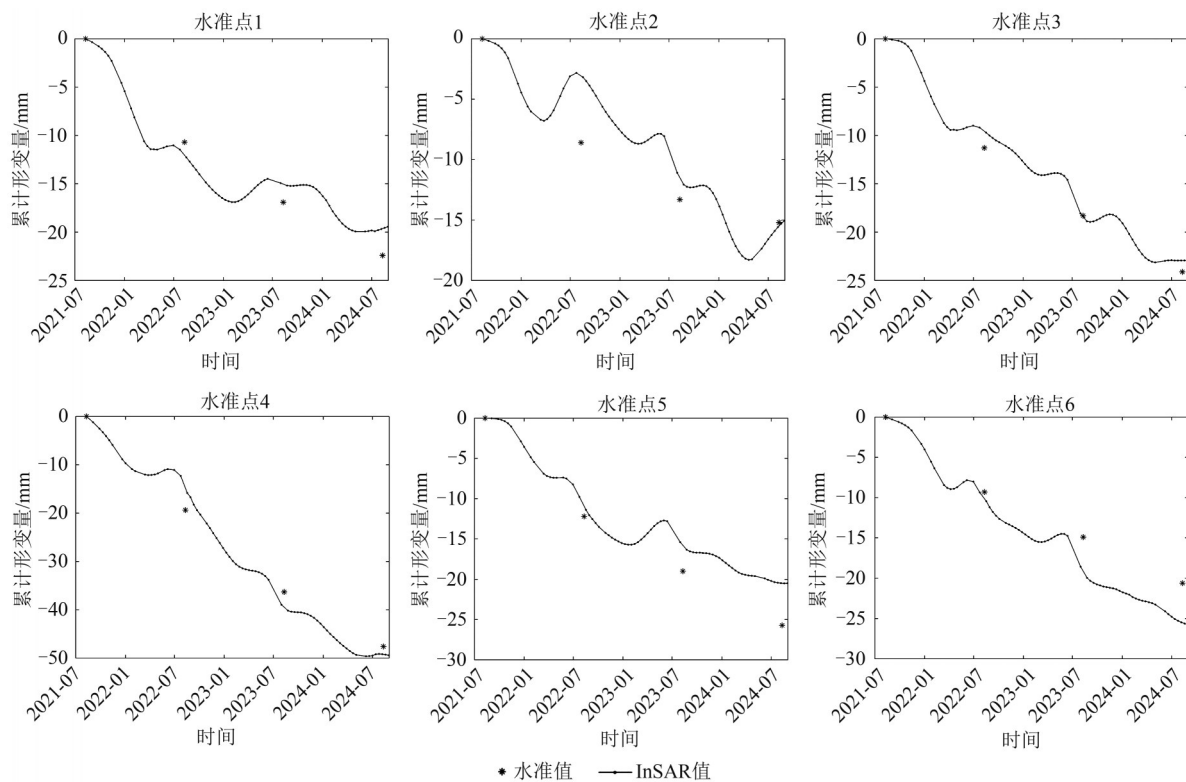


图8 6个水准点与InSAR累计形变量时序曲线对比

Fig. 8 Comparison of time series curves of cumulative deformation between six leveling points and InSAR

5 结论

本文基于FS-InSAR技术,利用79期Sentinel-1时序雷达影像,开展了2021年8月—2024年8月研究区全域精细形变监测,并详细分析了研究区的地表形变时空分布特征。主要结论如下:

(1) FS-InSAR技术可获取水域、农田较多的研究区高精度高密度的地表形变信息,实验监测

密度高达1121个点/ km^2 ,实现了除水体之外的全像素地表形变监测。28个同步获取的水准数据验证表明,FS-InSAR的地表形变监测结果与水准测量的差值标准差为2.9 mm/a。

(2) 研究区新老腔呈显著的差异化地表形变特征。老腔区域发育一定程度的地面沉降,最大沉降速率高达82 mm/a;新腔区域的沉降相对较小,沉降速率大多为10—20 mm/a,这一差异可能

与新腔采用天然气阻溶回溶、氮气阻溶水溶等先进造腔技术有关,从而有效控制腔体形状,减少了应力集中,稳定性更好。

(3) 时序分析表明,研究区的周期性地表形变与注采气活动高度相关。在采气阶段,储层孔隙压力释放,岩石骨架发生弹性回缩,地表主要表现为沉降。反之,在注气阶段,则主要表现为地表抬升。因此在运行期间,应密切监测腔内压力,防止压力过大或过小带来的岩层蠕变过大的风险。

志 谢 感谢欧洲航天局提供 Sentinel-1 SAR 影像以及 CopDEM 数据。

参考文献(References)

Berardino P, Fornaro G, Lanari R and Sansosti E. 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]

Chen W, Yu P F, Xiong W, Li J, Feng G C and Qiao X J. 2016. InSAR deformation monitoring and simulation of underground gas storage in Hutubi, Xinjiang. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 36(9): 803-807, 812 (陈威, 余鹏飞, 熊维, 李杰, 冯光财, 乔学军. 2016. 新疆呼图壁地下储气库的 InSAR 形变监测与模拟. *大地测量与地球动力学*, 36(9): 803-807, 812) [DOI: 10.14075/j.jgg.2016.09.011]

Ding G S. 2007. General introduction on key technologies of the construction of Jintan underground salt cavern gas storage. *Natural Gas Industry*, 27(3): 111-113, 15-16 (丁国生. 2007. 金坛盐穴地下储气库建库关键技术综述. *天然气工业*, 27(3): 111-113, 15-16) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0976.2007.03.037]

Du Z F, Li G P, Liu Z K, Shang X M, Kang S J and Wang X Q. 2025. Comprehensive analysis of multiple monitoring methods in main subsidence areas. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 54(3): 481-492 (杜钊锋, 李国鹏, 刘站科, 尚夏明, 康胜军, 王晓强. 2025. 国家重点沉降区域多监测手段综合分析. *测绘学报*, 54(3): 481-492) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2025.20230141]

Eineder M, Hubig M and Milcke B. 1998. Unwrapping large interferograms using the minimum cost flow algorithm//IGARSS '98. *Sensing and Managing the Environment*. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing. Symposium Proceedings. Seattle: IEEE: 83-87 [DOI: 10.1109/IGARSS.1998.702806]

Ferretti A, Prati C and Rocca F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20 [DOI: 10.1109/36.898661]

Ferretti A, Tamburini A, Novali F, Fumagalli A, Falorni G and Rucci A. 2011. Impact of high resolution radar imagery on reservoir monitoring. *Energy Procedia*, 4: 3465-3471 [DOI: 10.1016/j.egypro.2011.02.272]

Fibbi G, Beni T, Fanti R and Del Soldato M. 2023. Underground gas storage monitoring using free and open source InSAR data: a case study from Yela (Spain). *Energies*, 16(17): 6392 [DOI: 10.3390/en16176392]

Fibbi G, Landini N, Intrieri E, Del Ventisette C and Del Soldato M. 2025. Open-Source INSAR data to detect ground displacement induced by underground gas storage reservoirs. *Earth Systems and Environment*, 9(4): 3083-3100 [DOI: 10.1007/s41748-025-00593-3]

Goldstein R M and Werner C L. 1998. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25(21): 4035-4038 [DOI: 10.1029/1998GL900033]

Li Y P, Shi X L, Yang C H and Qu D A. 2012. Several key problems about control of solution mining for oil/gas storage in deep salt mine. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(9): 1785-1796 (李银平, 施锡林, 杨春和, 屈丹安. 2012. 深部盐矿油气储库水溶造腔控制的几个关键问题. *岩石力学与工程学报*, 31(9): 1785-1796)

Liu Y, Wu H A, Zhang Y H, Lu Z, Kang Y H and Wei J J. 2025. 3D automatic detection and correction for phase unwrapping errors in time series SAR interferometry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 220: 232-245 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2024.12.013]

Mei W S, Zhang Z L, Guo J M and Huang Q Y. 2002. Software of georobot deformation monitoring system. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 27(2): 165-171 (梅文胜, 张正禄, 郭际明, 黄全义. 2002. 测量机器人变形监测系统软件研究. *武汉大学学报(信息科学版)*, 27(2): 165-171) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-8860.2002.02.011]

Teatini P, Castelletto N, Ferronato M, Gambolati G, Janna C, Cairo E, Marzorati D, Colombo D, Ferretti A, Bagliani A and Bottazzi F. 2011. Geomechanical response to seasonal gas storage in depleted reservoirs: a case study in the Po River basin, Italy. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F2): F02002 [DOI: 10.1029/2010jf001793]

Wan W, Chen X W, Peng X F, Bai W H, Xia J M, Liang H, Zhang X M, Xiong P, Yang T, Cao Y C, Yin C, Zhao L M and Hong Y. 2016. Overview and outlook of GNSS remote sensing technology and applications. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 858-874 (万玮, 陈秀万, 彭学峰, 白伟华, 夏俊明, 梁宏, 张学民, 熊攀, 杨婷, 曹云昌, 尹聪, 赵利民, 洪阳. 2016. GNSS 遥感研究与应用进展和展望. *遥感学报*, 20(5): 858-874) [DOI: 10.11834/jrs.20166228]

Wang Z G, Dou K P and Yang Y H. 2022. A study on pattern and mechanism of surface deformation of underground gas storage in Hutubi. *Journal of Southwest Petroleum University (Science and Technology Edition)*, 44(1): 79-90 (王泽根, 窦可璞, 杨莹辉. 2022. 呼图壁地下储气库地表形变模式与机理研究. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 44(1): 79-90) [DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2019.11.22.03]

Wanyan Q Q, An G Y, Li K, Li D X, Gou Y X, Ran L N and Bai S. 2020. Status and development direction of salt-cavern gas storage technologies. *Oil Drilling and Production Technology*, 42(4): 444-448 (完颜祺琪, 安国印, 李康, 李东旭, 垢艳侠, 冉莉娜, 白松. 2020. 盐穴储气库技术现状及发展方向. *石油钻采工艺*, 42(4): 444-448) [DOI: 10.13639/j.odpt.2020.04.010]

Wu H A, Zhang Y H, Kang Y H, Wei J J, Liu Y and Li B P. 2024. Fine

mapping of surface deformation in Xinjing open-pit mine, Inner Mongolia using FS-InSAR technique. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 49(3): 389-399 (吴宏安, 张永红, 康永辉, 魏钜杰, 刘莹, 李柏鹏. 2024. 利用FS-InSAR技术精细监测内蒙古新井露天矿地表形变. *武汉大学学报(信息科学版)*, 49(3): 389-399) [DOI: 10.13203/j.whugis20230080]

Wu H A, Zhang Y H, Kang Y H, Wei J J, Lu Z, Yan W, Wang H G, Liu Z H, Lv X W, Zhou M T, Li K, Liu Y and Liu N. 2024. SAR inter-

ferometry on full scatterers: mapping ground deformation with ultra-high density from space. *Remote Sensing of Environment*, 302: 113965 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113965]

Yao W and Xiao E S. 2024. The present situation and trend of salt cavern gas storage construction technology in China. *China Well and Rock Salt*, 55(4): 7-10 (姚威, 肖恩山. 2024. 我国盐穴储气库建设技术发展现状及趋势. *中国井矿盐*, 55(4): 7-10) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-0335.2024.04.004]

Fine mapping and spatiotemporal evolution analysis of ground deformation in salt cavern gas storage using the FS-InSAR technique

ZHANG Jiaji^{1,2}, WU Hongan^{1,2}, LIU Zhenzhen³, ZHANG Yonghong², WANG Ziyu³,
KANG Yonghui^{1,2}, WEI Jujie²

1. School of Surveying, Mapping and Geography, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100036, China;

3. China Petroleum Engineering & Construction Corp, North China Company, Cangzhou 062550, China

Abstract: China faces significant contradictions in natural gas supply-demand and substantial peak-shaving requirements. This scenario makes underground gas storage facilities a critical infrastructure for ensuring a stable gas supply. However, salt rock creep induced by high-pressure operations in salt cavern gas storage can trigger pronounced ground deformation, which poses severe threats to the safe production of storage facilities. Thus, accurately mapping fine ground deformation of gas storage facilities has become a prerequisite for ensuring their safe and stable operation. This study aims to characterize the spatiotemporal patterns of ground deformation in a large-scale salt cavern gas storage using the advanced time series Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technique. It also aims to validate the feasibility of high-precision monitoring for hazard prevention.

This research employs the latest full scatterer InSAR (FS-InSAR) technique. This technique can separate the temporal low-frequency deformation phase from the temporal high-frequency phases, such as atmospheric delay contribution, to process 79 Sentinel-1 C-band SAR images acquired from August 2021 to August 2024. The dataset covers a large-scale salt cavern gas storage in eastern China. The study retrieves millimetric-level ground deformation rates and cumulative deformation through time-series SAR processing, including interferogram generation, phase unwrapping, dual-scale temporal low-pass filtering, and deformation inversion. Additionally, leveling measurements collected synchronously are used to validate the accuracy of FS-InSAR results.

FS-InSAR technology can obtain high-precision and high-density ground deformation in gas storage areas with abundant water and farmland. The monitoring density reaches up to 1,121 points/km², enabling full-pixel deformation monitoring for all areas except water bodies. Validation by 28 synchronously leveling data shows that the standard deviation of the difference between the FS-InSAR and leveling measurements is 2.9 mm/a.

The new and old cavities in this gas storage exhibit significantly differentiated deformation characteristics. Severe land subsidence has occurred in the old cavity area, with a maximum subsidence rate of up to 82 mm/year. Subsidence in the new cavity area is relatively minor, mostly with subsidence rates of 10–20 mm/a. This difference may be related to the application of advanced technologies, such as natural gas resistance dissolution and redissolution cavity construction in new cavities. These technologies can effectively control cavity shape, reduce stress concentration, and enhance stability.

Time-series analysis shows that the periodic surface deformation of the gas storage is highly correlated with gas injection and production activities. During the gas production stage, the release of reservoir pore pressure causes elastic retraction of the rock skeleton, thereby leading to ground subsidence. Conversely, ground uplift is observed during the gas injection stage. Therefore, the pressure inside the cavity should be closely monitored during the operation of the gas storage to prevent the risk of rock creep caused by excessively high or low pressures.

This study highlights the effectiveness of FS-InSAR in providing high-resolution, continuous monitoring of surface deformation in salt cavern gas storage facilities. The identified spatial heterogeneity and periodic deformation patterns underscore the importance of integrating radar remote sensing with operational data for real-time safety assessment. The technology enables early detection of high-risk zones (e.g., old caverns with severe subsidence) and facilitates adaptive management of gas storage operations. The findings contribute to the development of intelligent monitoring systems for underground energy storage infrastructure. This development supports a sustainable and secure gas supply in China's energy transition.

Key words: InSAR, Full Scatterer (FS), salt cavern gas storage, surface deformation, gas injection and production

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42274047); National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFC3007202); Science and Technology Project of Ministry of Natural Resources and Provinces of China (No. A2520); Fundamental Research Funds from Chinese Academy of Surveying and Mapping (No. AR2408, AR2509)