

天津八里台突发沉降多波段星载SAR监测及其时空演变特征分析

闫世勇¹, 郭兵燕¹, 刘斌², 乔鑫¹, 张丽²

1. 中国矿业大学 自然资源部国土环境与灾害监测重点实验室, 徐州 221116;

2. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083

摘要: 2023年5月31日天津八里台突发沉降给周边建筑和基础设施造成了严重破坏, 开展相应区域的长期地表形变高精度监测对于揭示其诱发与产生机制及相关灾害的防治具有重要意义。天津八里台突发沉降形变量级大、持续周期长且非线性特征显著, 针对单源SAR数据InSAR形变监测面临的梯度失相干和时空分辨率低问题, 本文结合多波段SAR数据优势, 基于其高分辨率强度和高精度相位信息提出了多级可变窗口多时相加权像素跟踪和DS-InSAR联合的复杂形变提取技术, 并利用2022-01—2024-12共57景C波段Sentinel-1和19景L波段陆探1号SAR数据, 获取并分析了突发沉降区域在事件前期、初期和后期的形变信息。结果表明: (1) 八里台沉降事件具有显著突发性和阶段性, 相应区域在事件发生前(2022-01-01—2023-05-31)基本保持稳定, 地表形变量位于-3—3 mm/a, 事件初期(2023-05-31—2023-06-07)最大形变超过-4.5 m, 事件后期(2023-06-07—2024-12-28)形变速率快速降低并趋于平稳, 且与同期两个GNSS站点监测结果具有显著一致性, 其决定系数 R^2 分别为0.98和0.97, RMSE分别为3.31 mm和5.85 mm; (2) 沉降中心与地热钻井位置之间的空间相关性, 及其时序累计形变的演变模式, 进一步佐证了地热资源开采作业中突遇特殊地质构造可能是诱发本次突发沉降的主要原因。本文研究可为八里台突发沉降的产生及其动力学机制解析奠定技术和数据基础, 有利于优化地热资源开发技术和促进城市安全及其可持续发展。

关键词: 八里台突发沉降, Sentinel-1, LuTan-1, 像素跟踪, DS-InSAR, 时空演变

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 闫世勇, 郭兵燕, 刘斌, 乔鑫, 张丽. 2026. 天津八里台突发沉降多波段星载SAR监测及其时空演变特征分析. 遥感学报, 30(3): 534-543

Yan S Y, Guo B Y, Liu B, Qiao X and Zhang L. 2026. Monitoring and spatiotemporal evolution characteristics analysis of sudden Subsidence in Tianjin Balitai with multi-band spaceborne SAR. National Remote Sensing Bulletin, 30(3):534-543[DOI:10.11834/jrs.20255054]

1 引言

城市地面沉降作为全球性缓变地质灾害, 在墨西哥、美国和中国等国一些中大型城市就普遍存在, 成为威胁城市建筑和重要基础设施安全的重要地质灾害之一(Cabral-Cano等, 2008; 朱琳等, 2024)。中国华北平原、长江三角洲和汾渭盆地等多个区域均发生了不同程度的地面沉降, 自上世纪90年代, 位于相应区域的北京、天津、上海和西安等多个城市面临严重的地面沉降地质灾害

害问题(Chen等, 2020; Zhang等, 2023; Ao等, 2024; Yu等, 2022), 其中天津因其地下松散层巨厚、含水层结构极其复杂和地下水开采历史悠久等特点, 成为中国受地面沉降影响最严重的城市之一, 通过持续实施地下水开采管控与回灌等措施, 地表沉降虽然得到了一定的控制, 但沉降治理形势依然十分严峻(李华等, 2022; 司新毅等, 2023; 于冰等, 2023), 因此, 全面开展城市地面沉降监测, 及时发现和治理城市地质灾害隐患, 有助于减少灾害带来的损失, 推动城市的可

收稿日期: 2025-02-14; 预印本: 2025-05-27

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2021YFC3000400); 自然资源部航空地球物理与遥感地质重点实验室开放基金(编号:2023YFL24)

第一作者简介: 闫世勇, 研究方向为InSAR形变监测与环境灾害遥感。E-mail: yanshiyong@cumt.edu.cn

通信作者简介: 刘斌, 研究方向为地质灾害InSAR监测。E-mail: lbin0226@163.com

持续发展。

GNSS、水准测量和激光扫描等是开展地表沉降监测的常用方法，具备测量精度高和监测频次高等特点，但依赖于地表人工布站和沉降分布等先验条件，存在测量成本高、作业周期长和测量点少等不足（朱琳 等，2024），难以满足城市尺度大面积广域地表沉降监测的需求。星载差分干涉测量技术（D-InSAR）凭借其全天候、全天时、覆盖范围广和分辨率高等特点为城市地表形变监测提供了一种有效途径，具备其他地面及空间观测技术无可比拟的优势（李广宇 等，2018）。而且，随着 SAR 传感器的性能提升，以及 PS-InSAR、SBAS-InSAR 和 DS-InSAR 等时序 InSAR 技术的提出与应用，有效抑制了 D-InSAR 存在的轨道误差、时空失相干和大气延迟误差等局限，实现了毫米级地表形变的高精度监测，而大量级形变的提取则以基于 SAR 强度信息的像素跟踪算法（POT）技术为主，其能够克服梯度失相干等问题且无需相位解缠，对大形变监测具有良好的适用性（Cai 等，2022；Vajedian 等，2023），以上技术近年来广泛应用于城市地表沉降监测与分析、断层活动监测、滑坡灾害监测和桥梁等重要基础设施活动性分析（朱建军 等，2017；Bekaert 等，2020；李振洪 等，2023；Wu 等，2024）。众多学者也基于多源 SAR 数据和时序 InSAR 技术开展了天津地表形变长期监测（Su 等，2023；司新毅 等，2023），深入研究了天津地表沉降成因机制及其时空演变规律，为城市安全和可持续发展提供了重要的科学数据支撑。

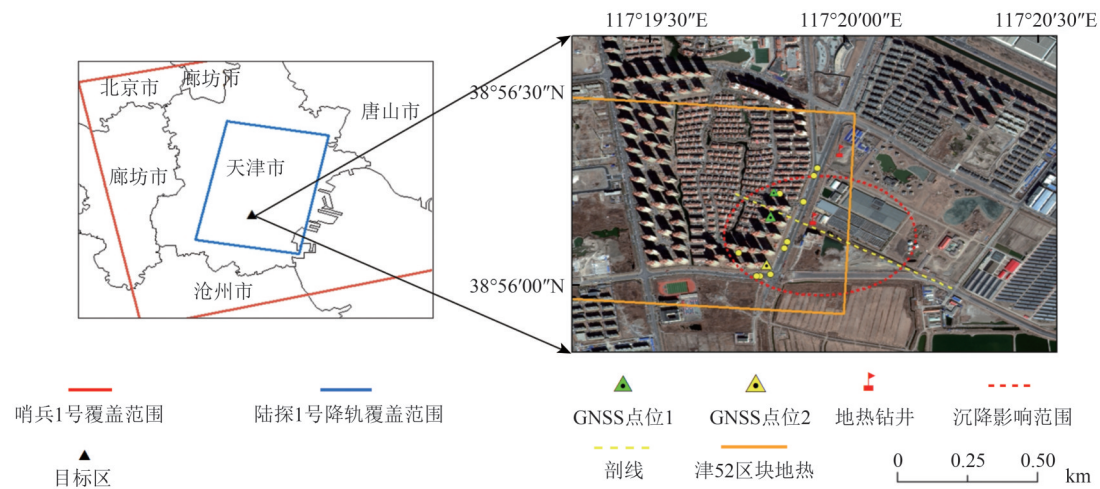
近年来，随着天津市规模扩大和地热等资源的深入开采与利用，地表沉降现象持续发育（司新毅 等，2023；张倩 等，2024），且偶发的大量级沉降也给城市建筑安全带来了严重影响，如 2023 年 5 月 31 日八里台发生的严重地表沉降事件，然而传统 InSAR 技术因受制于梯度失相干和时空分辨率低等因素，难以有效捕获短期内发生的大量级形变，无法全面分析其对周围地表稳定性的影响。为此，本文针对天津八里台地表沉降事件，联合 L 波段陆探 1 号（LuTan-1）和 C 波段 Sentinel-1 SAR 数据，开展相应区域地表大量级沉降的提取，以及事件发生前后地表沉降的长时序监测，分析研究八里台沉降事件的时空演变特征及其成因机

理，进而助力天津地热资源合理开发及城市建筑安全与可持续发展。

2 研究方法或原理

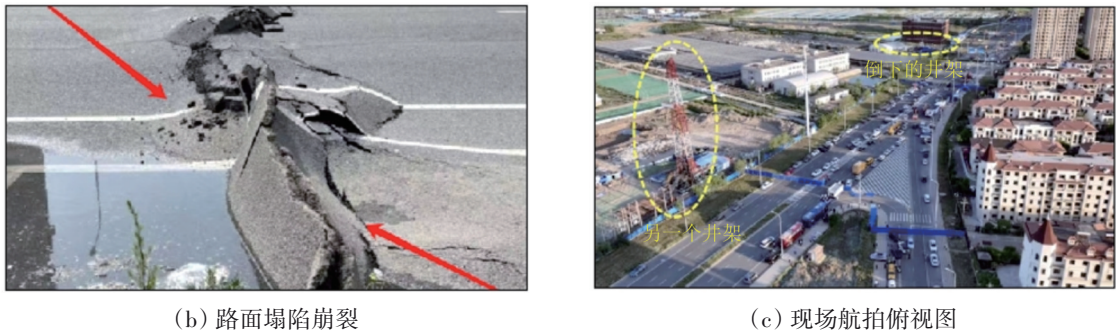
天津市地处中国华北平原东北部，以第四系巨厚松散沉积层覆盖为主，主要包括第Ⅱ，第Ⅲ和第Ⅳ组承压水，深度主要位于 180—450 m，也是中国东部地热资源最丰富的地区，其中新近系馆陶组和蓟县系雾迷山组是天津主力开发的热储层位（邱京卫 等，2023）。近年来通过采用“深孔换热”和高效回灌技术，有效缓解了地表沉降现象的发生（Su 等，2023；徐佳 等，2024）。然而，随着地热资源的大范围开发利用，以及地下复杂地质条件的认知不足，也会导致严重地表沉降灾害的发生（唐嘉 等，2015；肖亮 等，2019；Herrera-García 等，2021），2023 年 5 月底至 6 月初天津市津南区 52 区块蓟县系雾迷山组地热资源钻探开发过程中，出现了短期内因地表大量级不均匀沉降诱发的八里台沉降事件（图 1），对周边的住宅、道路和居民安全等造成了严重破坏和威胁。

为了准确掌握事件相关地表形变的分布及其演变过程，根据其不同阶段形变特征，本文将在事件前期（2022-01-01—2023-05-31）、事件初期（2023-05-31—2023-06-07）和事件后期（2023-06-07—2024-12-28）等 3 个阶段，利用中国 L 波段 LuTan-1 和欧洲航天局 C 波段 Sentinel-1 卫星获取的共计 76 景 SAR 数据开展了相应区域的地表形变长时序监测与分析（表 1），其中 LuTan-1 卫星是中国首颗具备单双星重轨干涉以及双星单航过干涉能力的科研 SAR 卫星，可为地面沉降、滑坡和地震等灾害的监测与防治提供数据支撑（刘斌 等，2024），Sentinel-1 卫星是欧洲航天局发射的具有全球快速覆盖能力的多模式 SAR 卫星，在地质灾害、城市监测和环境管理等领域发挥着巨大作用（李广宇 等，2018）。同时，基于 30 m 的哥白尼数字高程模型和精密轨道数据开展了地形相位补偿与地理编码以及轨道误差去除。另外，事件发生后布设的 GNSS 站点也为形变监测及精度分析提供了可靠的地面观测数据（图 1）。上述多波段星载数据将有助于揭示天津八里台突发地表沉降的时空演变特征，从而为沉降事件的产生及演变机制研究提供科学数据支撑。



(a) 研究区概况图

(a) Overview map of the study area



(b) 路面塌陷崩裂

(b) Road surface collapse and cracking

(c) 现场航拍俯视图

(c) Aerial view from the scene

图1 天津八里台突发沉降研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area of Tianjin Balitai sudden settlement

表1 陆探1和Sentinel-1数据及干涉对基本信息表
Table 1 Basic information of LuTan-1 and Sentinel-1 data and interferometric pairs

卫星	Sentinel-1A	LuTan-1A/B
入射角/(°)	34.56	34.13
方位角/(°)	-13.42	192.90
影像景数	57	19
轨道方向	升轨	降轨
时间范围	2022-01-01— 2024-12-28	2023-03-27— 2024-06-21
最大时间基线/d	84	36
最大空间基线/m	55	1047

3 研究方法

天津八里台沉降事件发生时间短、沉降量级和形变梯度大、破坏力强，给相应区域的形变监测带来了巨大挑战，为了更好地提取事件相关的地表形变分布信息，全面揭示事件前后地表形变

演变规律，本文联合多级可变窗口多时相加权像素跟踪（POT）技术和DS-InSAR技术，克服传统POT技术因低相干面临的随机性误差与连续性不足等问题，实现事件初期大量级形变提取，以及事件前后期微小形变的高精度长期监测，从而得到涵盖事件发生前后的完整形变分布信息，为其时空演变规律研究奠定技术和数据基础，本文方法的主要技术流程图如图2所示。

POT方法基于模版窗口与搜索窗口相位相关估计地表位移（式（1）），能够克服InSAR梯度失相干影响，具备更优地大量级形变监测能力（Cai等，2022）。为了降低大窗口对形变峰值的抑制作用，本文在基于差分干涉图圈定沉降区域边界和已知事件发生时刻的基础上，在LuTan-1数据相应的沉降区内采用多级不同大小的模版窗口，并以其相关性及相邻位移值的相似性判定相应窗口估算结果的可靠性，一般而言，模版窗口越小，相关性会有所降低，但其对形变估计值的抑制作用

越小，使得获取相应极值的可能性越大，接着利用事件前多期不同数据与事件后同一数据之间的多时相位移估计值及其相关性进行加权平均，能够得到事件初期地表大量级形变分布，最后利用自适应中值滤波进一步降低噪声，进而提升 POT 结果的准确性和可靠性。偏移量的计算公式如下：

$$\frac{F_1(u,v)F_2^*(u,v)}{|F_1(u,v)F_2^*(u,v)|} = e^{-j2\pi(ux_0 + vy_0)} \quad (1)$$

式中， $F_i(u, v)$, $i=1, 2$ 为模版和搜索窗口的频域信号， x_0 和 y_0 为相应的偏移量。

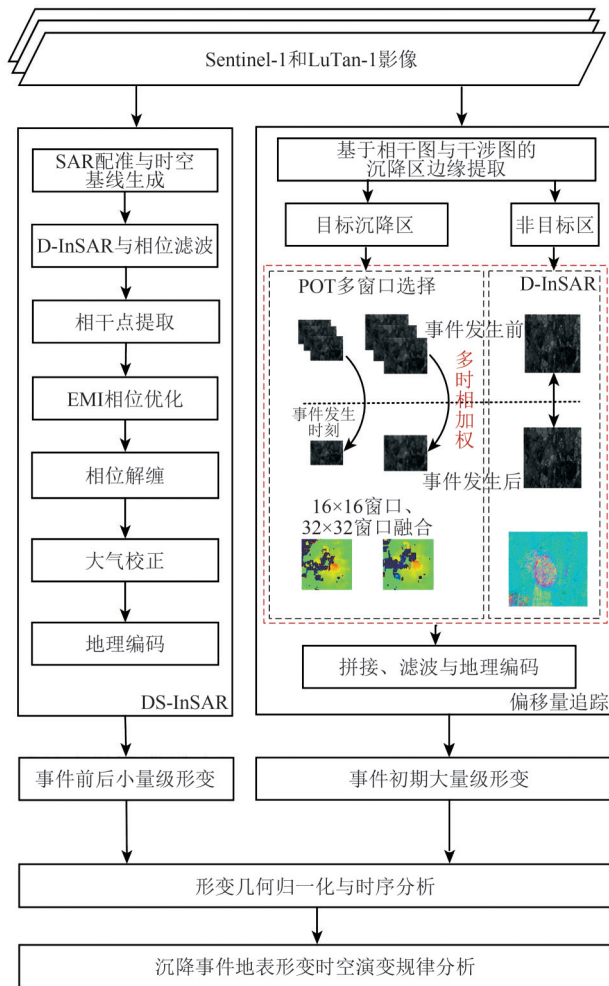


图2 技术方案流程图

Fig. 2 Flow chart of technical program

而事件前和后期小量级形变提取则主要基于 Sentinel-1 和 LuTan-1 数据的时序 DS-InSAR 技术，借助多主影像时空基线策略，以及 HTCI 同质像元提取与 EMI 相位优化方法 (Ansari 等, 2018)，在目标区域能够识别出更多的有效监测点，相应的相位表达式如式 (2) 所示。

$$\Delta\phi_{i,k} = \frac{4\pi}{\lambda} v_{i,k} t_k + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}^k \Delta h_i}{\rho_i \sin\theta_i} + \Delta\phi_{i,k}^{\text{res}} \quad (2)$$

式中， θ_i 为入射角， $B_{\perp}^k$ 为垂直基线， t_k 为时间基线， Δh_i 为高程误差， v_k 为形变速率， $\Delta\phi_{i,k}^{\text{res}}$ 为大气、轨道和噪声等引起的相位差异，其中 k 表示第 k 个干涉对， i 表示相应的监测点。

在利用低通滤波估计和去除轨道残差的基础上，针对小区域范围内大气延迟主要呈线性的特点，结合多项式估计和时空滤波方法，开展大气相位估计和补偿，能够大幅降低大气条件差异对该区域高精度形变监测的影响。另外，研究区地形平坦，结合较短的空间基线组合，能够更好地抑制地形残差影响，自适应滤波方法也能够进一步削弱噪声的影响，从而提升时序 InSAR 形变监测的精度和可靠性。

由于时序 InSAR 技术在大形变提取时面临梯度失相干等问题，所以该技术主要用于事件前期和事件后期的小量级形变提取与分析，难以用于探测事件发生初期的大量级形变。另外，由于 Sentinel-1A 和 LuTan-1 数据的成像几何关系不同，为了得到研究区的长时序形变监测结果，需要对不同卫星的形变监测结果进行几何归一化处理，本文以 LuTan-1 数据的观测几何条件为参考基准，基于地表沉降量较小时平面位移分量相对微弱且 InSAR 技术不敏感于平面位移的合理假设，利用下式可将 Sentinel-1 监测结果转换到参考几何条件下，实现融合多波段 SAR 数据的研究区形变长时序监测：

$$U_{\text{LT,D}} = \cos\theta_D U_Z = \cos\theta_D (U_{\text{SL,A}} / \cos\theta_A) \quad (3)$$

式中， $U_{\text{LT,D}}$ 和 θ_D ， $U_{\text{SL,A}}$ 和 θ_A 为分别为 Sentinel-1 和 LuTan-1 卫星的入射角及其相应的视线向位移量。

而当沉降量过快时，上述假设则不成立，因此，融合 Sentinel-1 监测结果时，本文以事件发生后微小形变对应的影像获取时间为参考连接点，从而克服成像几何不一致带来的问题。此外，不同数据和方法在目标区域的监测点位也难以保持一致，本文通过克里金插值获取同名点处的形变，进而形成完整覆盖八里台沉降事件不同阶段的时序形变信息，为该事件相关地表形变的时空演变特征研究提供必要的技术支撑。

4 结果与分析

围绕 2023 年 5 月末天津八里台突发沉降事件，

融合利用本文提出的多级可变窗口多时相加权 POT 和 DS-InSAR 技术, 以及 Sentinel-1 和 LuTan-1 数据, 得到了研究区在事件前期、事件初期和事件后期等 3 个不同阶段的地表形变分布, 详见图 3。可见: 在事件突发前期, 地表基本稳定, 相应区域并未出现明显异常形变, 对比地热资源开

发作业时间可知, 相应时段的施工基本正常, 地表保持稳定, 未发生显著形变, 仅在目标周边存在个别微小沉降区域, 由相应区域高分辨率光学影像解译可知, 其主要与地表自然压实有关, 且微小形变量未对城市建筑或基础设施造成破坏。

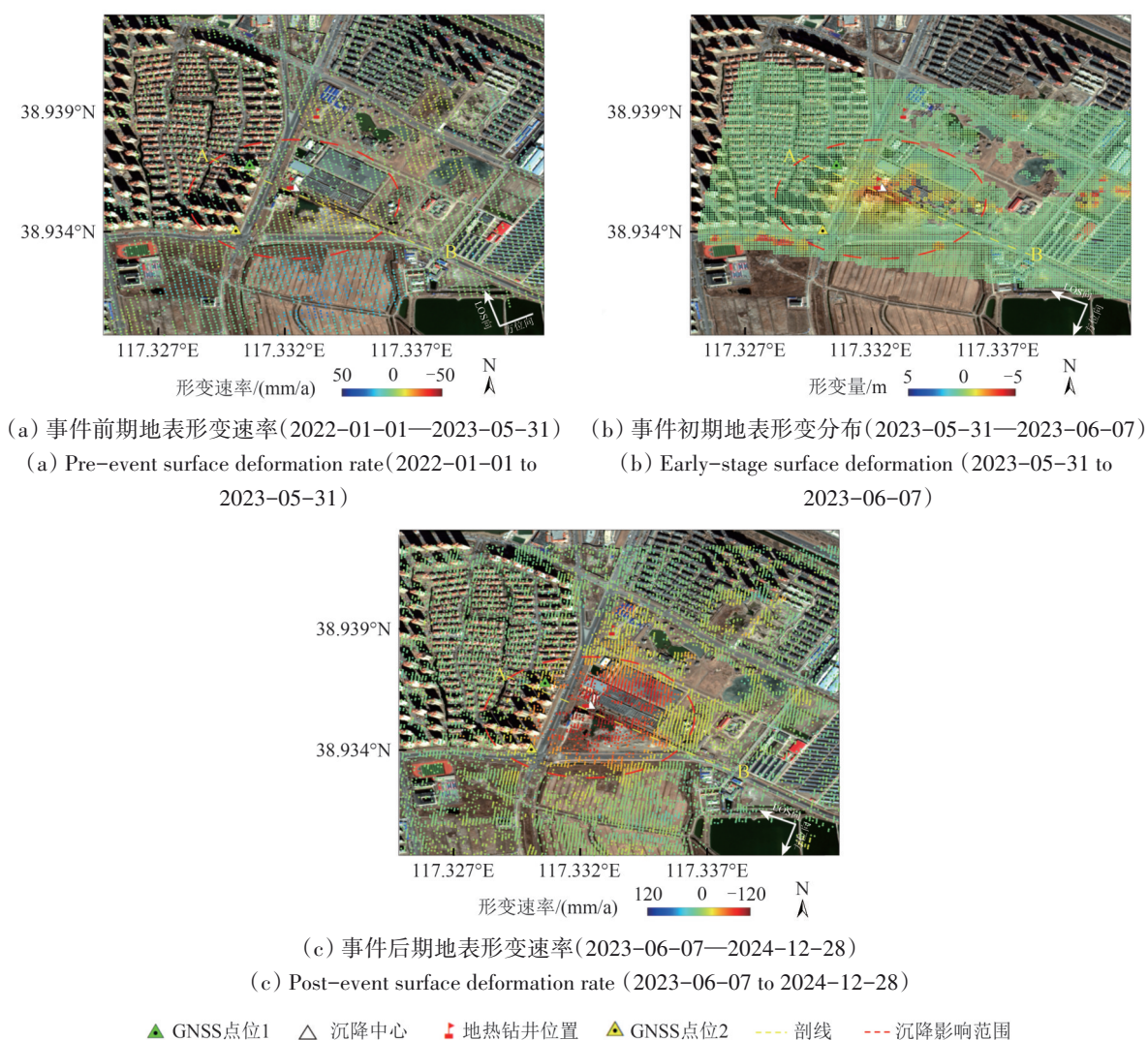


图3 研究区不同阶段地表形变速率分布图

Fig. 3 Surface deformation rate distribution at different stages in the study area

由事件发生初期的D-InSAR结果可知, 目标区域干涉条纹图因梯度失相干等因素仅在沉降区边缘残存部分相干条纹, 难以用于形变信息提取, 但可准确地反映出本次事件的影响范围, 约 0.32 km^2 (图 4 (b))。基于本文 POT 方法和 LuTan-1 数据一定程度上克服了失相干影响, 得到了事件初期地表沉降分布图 (图 3 (b)), 事件相关的大量级形变主要发生在该阶段, 由于 SAR 影像时间分辨率不足, 只能得到事件发生时刻至事件后第一景

SAR 影像获取日期 (2023-06-07) 的累积形变, 该阶段可探测最大视线向位移超过 -4.5 m , 位于南侧钻井口附近, 其中负号表示向远离卫星方向移动, 沉降中心区域与地热钻井之间的空间相关性, 以及事件发生时间与钻井作业时段的一致性 (图 1), 也在一定程度上佐证了地热资源钻孔作业与本次突发沉降事件密切相关。另外, 在南地热井北侧厂房附近可能存在浅部断裂, 削弱了形变北向延伸及其对该区域建筑的影响。

与事件初期受梯度失相干影响严重的干涉对不同, 图 4 (c) 和 (d) 中的缓变差分干涉相位表明, 相应期间内地表形变已极大缓解, 仅存在后

续压实相关的较小形变, 且相应的形变分布范围与初期基本一致, 依然呈现为中心量级大, 四周形变量较小的特点。

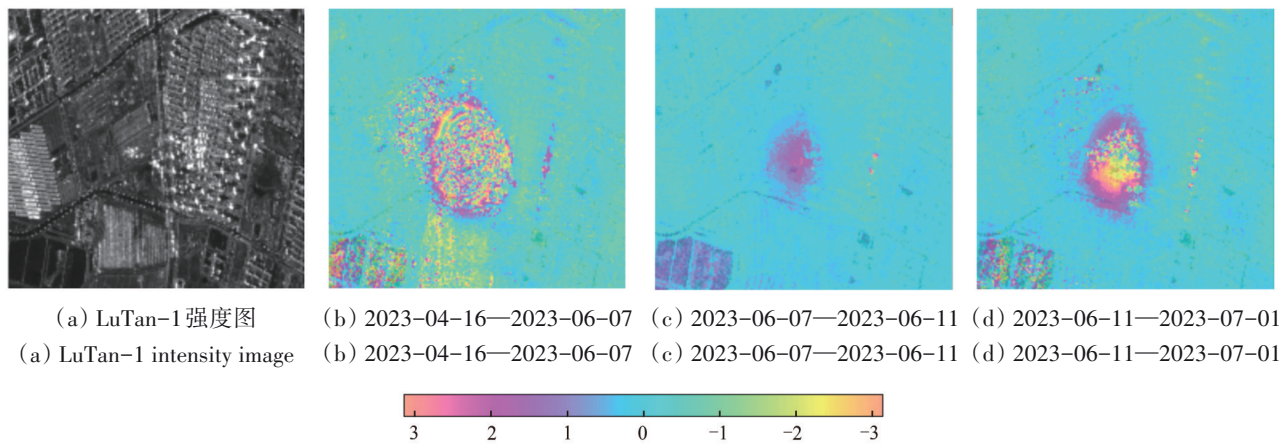


图 4 沉降区 LuTan-1 强度图及其差分干涉相位分布图

Fig. 4 Intensity map and differential interferometric phase distribution of the subsidence area in LuTan-1

鉴于沉降事件后期地表形变以小量级形变为主, 且持续时间较长, 为了更好地研究相应区域形变随时间的变化特征, 本文通过融合相应时段 Sentinel-1 和 LuTan-1 数据的 DS-InSAR 形变结果, 得到了该地区事件后期地表形变速率分布图 (图 3 (c)), 结果显示事件后期地表形变持续发育, 中心点依然位于南侧地热钻进附近, 事件后期形变速率达 -113 mm/a ; 位于沉降事件影响范围内西侧小区内的点形变速率在 $-60 \sim -5 \text{ mm/a}$ 。

根据沉降中心不同阶段的时序累计形变初步判定该事件为突发事件 (图 5 (a)), 事件前期 (2022-01-01—2023-05-31), 基于 Sentinel-1 数据的时序 InSAR 累计形变结果显示该地区地表呈现为稳定状态; 在事件发生初期 (2023-05-31—2023-06-07) 阶段地表沉降量级较大, 基于 LuTan-1 数据的 POT 结果显示其视线向位移最大超过 -4.5 m , 短时大量级形变引发了本次灾害事件, 造成了周边建筑和基础设施破坏; 事件后期 (2023-06-07—2024-12-28) 形变也具有明显的阶段性, 事件后 7 d 至 1 个月, 地表形变依然超过了 -6 cm , 1 个月之后, 地表形变速率逐步降低, 事件后 1 个月至 2023 年 12 月的形变量约为 -8 cm , 以上形变信息的提取以 LuTan-1 数据为主, 融合 LuTan-1 和 Sentinel-1 数据的结果显示, 2024 年上

半年形变速率进一步放缓, 相应时段的形变量约为 -4 cm , 2024 年 6—12 月, 形变量未超过 -2 cm 且速率趋于 0。不同阶段沿 AB 剖线的形变量与形变速率分布显示 (图 5 (b)), 该事件的沉降中心位置在事件初期和后期基本保持一致, 并与事件发生前沉降中心位置附近地表压实沉降区域并不一致, 表明八里台沉降事件的发生与周边已有沉降无关, 进一步佐证了沉降事件的突发性。

另外, 与两个 GNSS 站点同期形变监测结果对比分析表明, 本文时序 InSAR 监测结果与两个 GNSS 站点形变监测结果呈现出高度一致性, 其决定系数 R^2 分别为 0.98 (站点 1) 和 0.97 (站点 2), RMSE 分别为 3.31 mm 和 5.85 mm , 表明本文时序 InSAR 监测结果具有较高的精度和可靠性 (图 6)。同时, 依据沉降区时序累计形变及相应的指数衰减模型和多项式函数模型拟合结果可知, 其大部分地表将于 2025 年达到基本稳定, 而沉降中心区域达到基本稳定状态所需时间可能更长, 这主要源于该地区地下失水引发的覆岩变形与压实过程尚未完成。可见, 持续的地表形变监测不仅有助于掌握该区域形变的时空演变特征, 还能为该事件的诱发机制及其动力学过程研究提供数据支撑, 进而为该地区地热资源的可持续开发利用奠定理论基础。

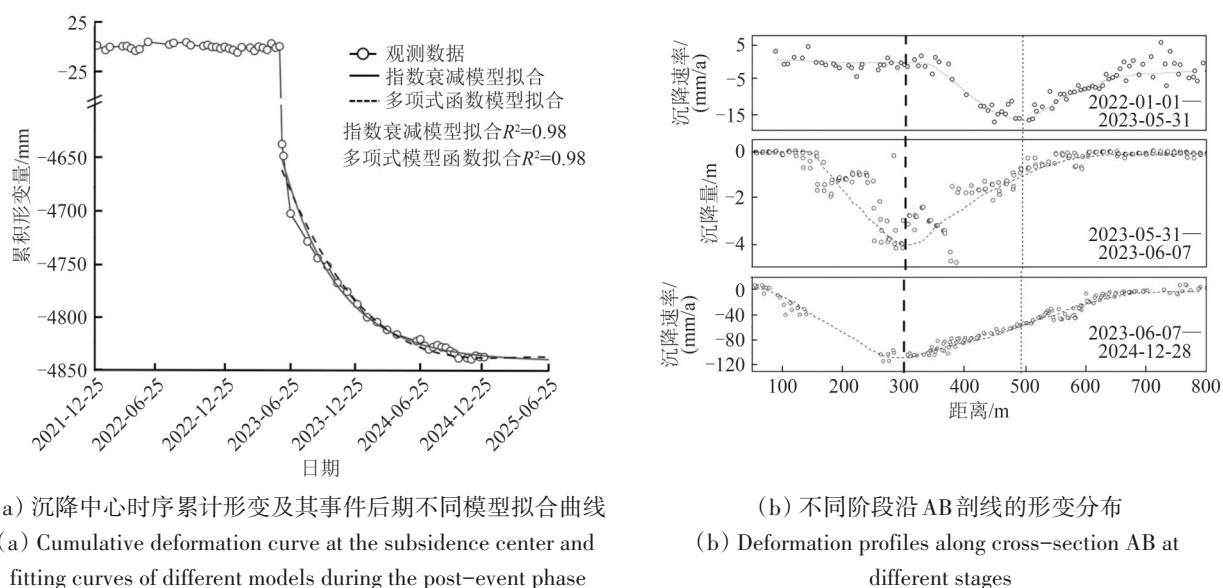


图5 沉降中心时序累计形变与沿 AB 剖线的形变

Fig. 5 Time-series cumulative deformation at the subsidence center and deformation along profile AB

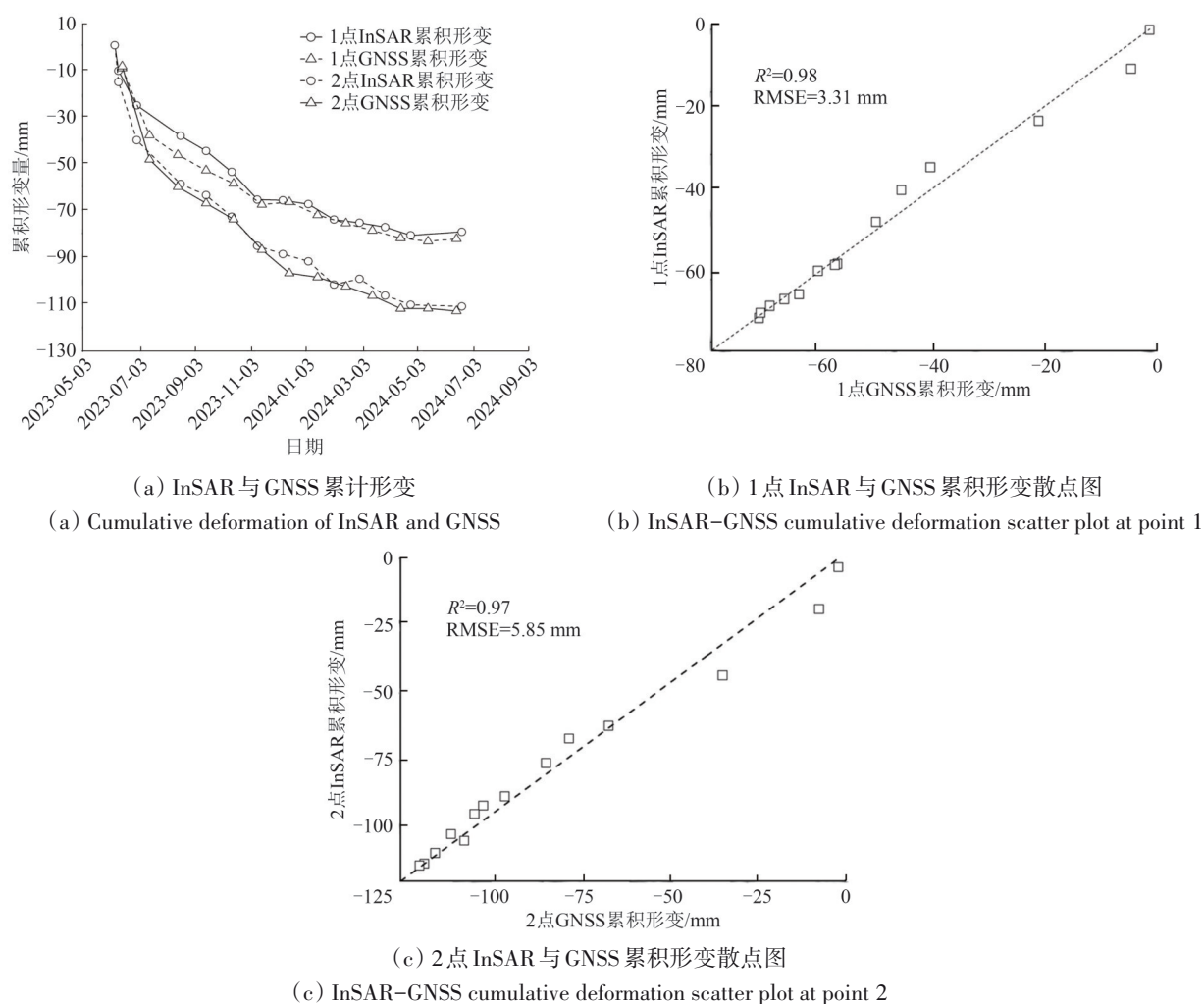


图6 InSAR 与 GNSS 累计形变精度对比与分析

Fig. 6 Accuracy comparison and analysis of cumulative deformation between InSAR and GNSS

5 结 论

本文围绕天津八里台沉降事件，提出多级窗口多时相加权像素跟踪技术，克服了事件初期大量级复杂形变带来的梯度失相干问题，基于 LuTan-1 数据得到了该事件初期大量级地表形变分布，同时利用 DS-InSAR 方法以及 Sentinel-1 和 LuTan-1 数据，提取了事件前后期相应区域的长时序小量级地表形变信息，并在此基础上开展了地表形变时空演变特征分析。主要结论如下：

(1) 八里台沉降事件具备显著的突发性，事件发生前地表稳定，事件初期的大量级地表形变超过 -4.5 m ，沉降影响范围约 0.32 km^2 ，最大形变位于南侧地热作业井附近，相应区域地热开采作业过程中突遇难以预见的破碎带和空洞等特殊地质构造，可能是诱发本次事件的主要原因，事件后期地表形变持续发育且阶段性显著，随着该地区地下含水层和上覆岩层逐步趋于新的力学平衡，地表形变逐步趋缓，预计 2025 年达到基本稳定。

(2) 多源多波段 SAR 数据克服了单一数据源的不足，结合本文方法能够更好地满足沉降事件复杂形变监测的需求，其中基于 Sentinel-1 和 LuTan-1 数据的时序 InSAR 方法对区域内小量级形变的长期演变刻画更准确，与同期 GNSS 形变监测结果之间具有显著一致性，二者决定系数 $R^2 \geq 0.97$ ，RMSE $\leq 6\text{ mm}$ ，而高空间分辨率的 L 波段 LuTan-1 数据和 POT 方法则在大梯度和大量级形变提取中更具优势，能够为目标区域多阶段长时序复杂形变监测及其时空演变特征分析奠定良好的方法和数据基础；

(3) 本文方法为天津八里台沉降事件提供了有力的监测方法，充分展现了中国 LuTan-1 卫星高时空分辨率的性能优势，准确提取的地表形变时空分布信息也为该沉降事件的机理与动力学过程研究奠定了数据基础，有利于进一步优化地热资源开发技术，促进城市安全及其可持续发展。

参考文献 (References)

Ansari H, de Zan F and Bamler R. 2018. Efficient phase estimation for interferogram stacks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(7): 4109-4125 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2826045]

Ao Z R, Hu X M, Tao S L, Hu X, Wang G Q, Li M J, Wang F, Hu L T,

Liang X Y, Xiao J F, Yusup A, Qi W H, Ran Q W, Fang J Y, Chang J F, Zeng Z Z, Fu Y S, Xue B L, Wang P, Zhao K F, Li L, Li W K, Li Y M, Jiang M, Yang Y H, Shen H H, Zhao X, Shi Y, Wu B, Yan Z B, Wang M J, Su Y J, Hu T Y, Ma Q, Bai H, Wang L J, Yang Z Y, Feng Y H, Zhang D H, Huang E H, Pan J M, Ye H Y, Yang C, Qin Y W, He C Q, Guo Y P, Cheng K, Ren Y, Yang H T, Zheng C Y, Zhu J L, Wang S P, Ji C J, Zhu B, Liu H Y, Tang Z Y, Wang Z H, Zhao S Q, Tang Y H, Xing H F, Guo Q H, Liu Y and Fang J Y. 2024. A national-scale assessment of land subsidence in China's major cities. *Science*, 384(6693): 301-306 [DOI: 10.1126/science.adl4366]

Bekaert D P S, Handwerger A L, Agram P and Kirschbaum D B. 2020. InSAR-based detection method for mapping and monitoring slow-moving landslides in remote regions with steep and mountainous terrain: an application to Nepal. *Remote Sensing of Environment*, 249: 111983 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111983]

Cabral-Cano E, Dixon T H, Miralles-Wilhelm F, Díaz-Molina O, Sánchez-Zamora O and Carande R E. 2008. Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City. *GSA Bulletin*, 120 (11/12): 1556-1566 [DOI: 10.1130/B26001.1]

Cai J H, Zhang L, Dong J, Wang C C and Liao M S. 2022. Polarimetric SAR pixel offset tracking for large-gradient landslide displacement mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112: 102867 [DOI: 10.1016/j.jag.2022.102867]

Chen B B, Gong H L, Chen Y, Li X J, Zhou C F, Lei K C, Zhu L, Duan L and Zhao X X. 2020. Land subsidence and its relation with groundwater aquifers in Beijing Plain of China. *Science of the Total Environment*, 735: 139111 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139111]

Herrera-García G, Ezquerro P, Tomás R, Béjar-Pizarro M, López-Vinielles J, Rossi M, Mateos R M, Carreón-Freyre D, Lambert J, Teatini P, Cabral-Cano E, Erkens G, Galloway D, Hung W C, Kakar N, Sneed M, Tosi L, Wang H M and Ye S J. 2021. Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371(6524): 34-36 [DOI: 10.1126/science.abb8549]

Li G Y, Zhang R, Liu G X, Yu B, Zhang B, Dai K R, Bao J W and Wei B W. 2018. Land subsidence detection and analysis over Beijing-Tianjin-Hebei area based on Sentinel-1A TS-DInSAR. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 22(4): 633-646 (李广宇, 张瑞, 刘国祥, 于冰, 张波, 戴可人, 包佳文, 韦博文. 2018. Sentinel-1A TS-DInSAR 京津冀地区沉降监测与分析. *遥感学报*, 22(4): 633-646) [DOI: 10.11834/jrs.20187196]

Li H, Dong X M and Zhang W. 2022. Evaluation of groundwater over-exploitation area and analysis of comprehensive treatment effect in Tianjin. *Haihe Water Resources*, (4): 32-35 (李华, 董晓敏, 张伟. 2022. 天津市地下水超采区评价及综合治理成效分析. *海河水利*, (4): 32-35) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-7328.2022.04.009]

Li Z H, Zhu W, Yu C, Zhang Q and Yang Y X. 2023. Development sta-

- tus and trends of imaging geodesy. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 52(11): 1805-1834 (李振洪, 朱武, 余琛, 张勤, 杨元喜. 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]
- Liu B, Zhang L, Ge D Q, Li M, Zhou X L, Guo Z C, Shi P Q, Zhang L, Jin D J, Wan X X, Wang Y and Wang Y. 2024. Application of InSAR monitoring large deformation of landslides using Lutan-1 constellation. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 49(10): 1753-1762 (刘斌, 张丽, 葛大庆, 李曼, 周小龙, 郭兆成, 石鹏卿, 张玲, 金鼎坚, 万祥星, 王宇, 王艳. 2024. 陆地探测一号卫星滑坡大变形 InSAR 监测应用. 武汉大学学报(信息科学版), 49(10): 1753-1762) [DOI: 10.13203/j.whugis.20230478]
- Qiu J W, Xin, Y Q, Shao B S and Liu Z. 2023. Development law of karst fractures in the thermal storage of Wumishan Formation in Southern Plain District of Tianjin. *Geological Survey of China*, 10(4): 81-88 (邱京卫, 辛玉齐, 邵炳松, 刘赞. 2023. 天津市南部平原区雾迷山组热储岩溶裂隙发育规律. 中国地质调查, 10(4): 81-88) [DOI: 10.19388/j.zgdzdc.2023.04.10]
- Si X Y, Xie X M and Li S. 2023. Surface deformation monitoring of Tianjin area based on PS-InSAR and random forest. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 43(7): 692-695, 766 (司新毅, 谢新民, 李盛. 2023. 基于 PS-InSAR 和随机森林的天津区域地表形变监测. 大地测量与地球动力学, 43(7): 692-695, 766) [DOI: 10.14075/j.jgg.2023.07.006]
- Su G L, Xiong C B, Zhang G Y, Wang Y, Shen Q, Chen X H, An H W and Qin L C. 2023. Coupled processes of groundwater dynamics and land subsidence in the context of active human intervention, a case in Tianjin, China. *Science of the Total Environment*, 903: 166803 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166803]
- Tang J, Liu G X, Song Y F, Chen W, Yu B, Wu S B, Zhang R and Deng L. 2015. Significant subsidence detection and analysis by PALSAR and ASAR PSI. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 19(6): 1019-1029 (唐嘉, 刘国祥, 宋云帆, 陈巍, 于冰, 吴松波, 张瑞, 邓琳. 2015. PALSAR 和 ASAR PSI 显著地表沉降探测与分析. 遥感学报, 19(6): 1019-1029) [DOI: 10.11834/jrs.20154283]
- Vajedian S, Afkari M, Mousavi Z, Ghods A, Walker R and Maurer J. 2023. Seismotectonic modeling of the 2017 Hojeh (Kerman) earthquake sequence from joint inversion of InSAR and offset tracking techniques. *Remote Sensing of Environment*, 288: 113461 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113461]
- Wu W Q, Zhang Y Z, Hao X Y and Liu J J. 2024. Three-dimensional displacement and slip distribution of the 2021 Mw 7.4 Maduo (Tibetan Plateau) earthquake determined by GNSS and InSAR. *Journal of Asian Earth Sciences*, 270: 106188 [DOI: 10.1016/j.jseae.2024.106188]
- Xiao L, He Y G, Xing X M, Wen D B, Tong C G, Chen L F and Yu X Y. 2019. Time series subsidence analysis of drilling solution mining salt mines based on Sentinel-1 data and SBAS-InSAR technique. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 23(3): 501-513 (肖亮, 贺跃光, 邢学敏, 闻德保, 童成功, 陈立福, 俞晓莹. 2019. Sentinel-1 和 SBAS-InSAR 分析钻井水溶岩盐矿山时序沉降. 遥感学报, 23(3): 501-513) [DOI: 10.11834/jrs.20198292]
- Xu J, Li J Q, Yan W, Yuan W, Lu X and Gu L J. 2024. Recharge effect prediction of deep groundwater in Tianjin. *Ground water*, 46(3): 74-76, 92 (徐佳, 李佳琦, 闫伟, 苑巍, 路旭, 顾立军. 2024. 天津市深层地下水回灌效果预测. 地下水, 46(3): 74-76, 92) [DOI: 10.19807/j.cnki.DXS.2024-03-024]
- Yu B, He Z Y, Tan Q X, Zhang G, Li G Y, She J, Wu T and Wang Y. 2023. Land subsidence monitoring and analysis of Tianjin-Hebei economic region based on Sentinel-1A TS-DInSAR. *Remote Sensing Technology and Application*, 38(2): 454-464 (于冰, 何智勇, 谭青雪, 张过, 李广宇, 余杰, 吴滔, 王杨. 2023. Sentinel-1A TS-DInSAR 京津冀核心经济区广域地表沉降监测与分析. 遥感技术与应用, 38(2): 454-464) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2023.2.0454]
- Yu W, Gong H L, Chen B B and Zhou C F. 2022. Spatial-temporal evolution characteristics and prediction of land subsidence in the eastern plain of Beijing. *Remote Sensing for Natural Resources*, 34(4): 183-193 (于文, 宫辉力, 陈蓓蓓, 周超凡. 2022. 北京东部平原区地面沉降时空演化特征及预测. 自然资源遥感, 34(4): 183-193) [DOI: 10.6046/zrzyyg.2021390]
- Zhang Q, Ma Y, Zhou H Y and Yan S Y. 2024. Analysis of local surface subsidence characteristics in Tianjin based on InSAR technology. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (2): 74-79 (张倩, 马悦, 周洪月, 闫世勇. 2024. 基于 InSAR 技术的天津局部地表沉降特征分析. 测绘通报, (2): 74-79) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2024.0213]
- Zhang Z H, Hu C T, Wu Z H, Zhang Z, Yang S W and Yang W. 2023. Monitoring and analysis of ground subsidence in Shanghai based on PS-InSAR and SBAS-InSAR technologies. *Scientific Reports*, 13(1): 8031 [DOI: 10.1038/s41598-023-35152-1]
- Zhu J J, Li Z W and Hu J. 2017. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1717-1733 (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]
- Zhu L, Gong H L, Li X J, Zhou C F, Ye M, Wang H G, Zhang K and Han M M. 2024. Research progress and prospect of land subsidence. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 51(4): 167-177 (朱琳, 宫辉力, 李小娟, 周超凡, 叶森, 王海刚, 张可, 韩苗苗. 2024. 区域地面沉降研究进展与展望. 水文地质工程地质, 51(4): 167-177) [DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202212043]

Monitoring and spatiotemporal evolution characteristics analysis of sudden Ssubsidence in Tianjin Balitai with multi-band spaceborne SAR

YAN Shiyong¹, GUO Bingyan¹, LIU Bin², QIAO Xin¹, ZHANG Li²

1. MNR Key Laboratory of Land Environment and Disaster Monitoring, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China

Abstract: On May 31, 2023, a sudden serious ground subsidence event occurred in Balitai, Tianjin, China, causing severe damage to surrounding buildings and infrastructure. Conducting long-term, high-precision surface deformation monitoring in the affected area is of great significance for understanding the mechanisms of the event and for the prevention and control of related disasters. The Balitai subsidence event is mainly characterized by a large magnitude of deformation, a long duration, and significant nonlinearity. Traditional single-source Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry (InSAR) techniques for such deformation monitoring face challenges brought by the large gradient-induced decorrelation and insufficient spatiotemporal resolution. To address these issues, this study proposes a complex deformation extraction technique that combines multilevel variable-window multitemporal weighted-pixel offset tracking with distributed scatterer InSAR (DS-InSAR), leveraging the high-resolution intensity and high-precision phase information of multiband SAR data. This approach could overcome the problems of random errors and lack of continuity in traditional pixel offset tracking due to its low coherence. Long-term deformation monitoring results after the subsidence event was obtained by applying geometric normalization to the deformation monitoring results of Sentinel-1 and LuTan-1 data on the basis of the assumption that the surface deformation is mainly vertical after the subsidence event. With 57 C-band Sentinel-1 and 19 L-band LuTan-1 SAR imagery from January 2022 to December 2024, this study obtained and analyzed the deformation information of the sudden subsidence area in the pre-event, initial, and post-event phases. Results show that the Balitai subsidence event is highly sudden and phased. The study area obviously remained stable before the event (January 2022—May 31, 2023), with average surface deformation velocity within -3 to 3 mm/year. During the initial phase (May 31—June 7, 2023), the maximum deformation exceeded -4.5 m near the southern wellheads. In the post-event phase (June 7, 2023—December 28, 2024), the deformation rate decreased rapidly and showed significant consistency with the monitoring results of two GNSS stations during the same period, with a coefficient of determination of 0.98 and 0.97, and a root mean square error of 3.31 and 5.85 mm, respectively. The corresponding results thus validate the reliability of time-series InSAR monitoring outcomes. The cumulative deformation and the results obtained by fitting the exponential decay and polynomial function models indicate that most of the surface will have stabilized by 2025. The spatial correlation between the subsidence center and the geothermal well location, as well as the temporal consistency between the event timing and the drilling operation period, suggest that improper geothermal resource exploitation may be the main cause of the sudden subsidence. The proposed method could provide a powerful spatial monitoring approach for the Balitai subsidence event, fully demonstrating the high spatiotemporal resolution performance of China's LuTan-1 satellite. It also lays a technical and data foundation for the analysis of the generation and dynamic mechanisms of the sudden subsidence in Balitai, which is conducive to optimizing geothermal resource development techniques and promoting urban safety and sustainable development.

Key words: Balitai Sudden Subsidence, Sentinel-1, LuTan-1, pixel tracking, DS-InSAR, spatiotemporal evolution

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFC3000400); Open Fund of the Key Laboratory of Airborne Geophysics and Remote Sensing Geology of the Ministry of Natural Resources (No. 2023YFL24)