



土木工程学报
China Civil Engineering Journal
ISSN 1000-131X, CN 11-2120/TU

《土木工程学报》网络首发论文

题目：融合 InSAR 技术与大数据的城市建筑群结构变形风险评估——以台北市为例
作者：周云，陈建伟，郝官旺，朱诗琪，易伟建
DOI：10.15951/j.tmgcxb.24070519
收稿日期：2024-07-12
网络首发日期：2024-11-22
引用格式：周云，陈建伟，郝官旺，朱诗琪，易伟建. 融合 InSAR 技术与大数据的城市建筑群结构变形风险评估——以台北市为例[J/OL]. 土木工程学报.
<https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb.24070519>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.15951/j.tmgcxb.24070519

融合 InSAR 技术与大数据的城市建筑群结构变形风险评估——以台北市为例

周云^{1,2} 陈建伟¹ 郝官旺¹ 朱诗琪¹ 易伟建^{1,2}

(1. 湖南大学, 湖南长沙 410082; 2. 湖南大学工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南长沙 410082)

摘要：高效的城市建筑群变形风险监测是提高建筑韧性从而提高城市韧性的重要方法。本研究以台北市为例，将 InSAR 测量技术与城市历史温度数据、地下水位数据、GNSS 监测数据、光学卫星影像、城市实景三维图像等大数据结合，提出了一种大范围、低成本、可持续的城市建筑群安全风险多尺度分析方法。在城市级广域尺度层面，利用 PSI 技术获取了该地区从 2019 年 1 月到 2024 年 2 月的大范围变形，并利用 GNSS 测站数据验证了变形观测结果，揭示了地表变形与地下水位变化的高度正相关性。根据异常地表变形趋势识别风险区域后，在片区级中域尺度层面，本研究利用综合 SAR 卫星升降轨影像分析的反距离权重插值法获取某风险变形区域的异常变形场，发现隧道施工导致地下水位变化是该区域异常变形的主要原因。在建筑级局域尺度层面，本研究提出结合结构损伤风险和整体变形风险的建筑风险评估方法，提高了建筑风险的识别精度。与传统利用宏观变形指标评估建筑风险的方法相比，本研究所提出的方法体系可以得到更加准确、全面的建筑风险评估结果。

关键词：结构健康监测；多尺度监测；PSI 技术；IDW 插值法；变形模式；建筑风险评估

中图分类号：TU196.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-131X(2020)××-××××-××

Structural Deformation Risk Assessment of Urban Building Complex by Integrating InSAR Technology and Big Data - A Case Study of Taipei City

ZHOU Yun^{1,2} CHEN Jianwei¹ HAO Guanwang¹ ZHU Shiqi¹ YI Weijian^{1,2}

(1. Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory for Damage Diagnosis of Engineering Structures of Hunan Province)

Abstract: Efficient monitoring of urban building clusters for deformation risks is an essential approach to enhancing building resilience and consequently increasing urban resilience. This study takes Taipei City as an example and proposes a large-scale, low-cost, sustainable method for multi-scale analysis of urban building group safety risks by integrating InSAR measurement technology with urban historical temperature data, groundwater level data, GNSS monitoring data, optical satellite imagery, and urban real-world three-dimensional images, among other big data sources. At the city's broad-scale level, the study employed PSI technology to obtain extensive deformation data spanning from January 2019 to February 2024 in the region. These observations were validated using GNSS station data, revealing a strong positive correlation between surface deformation and changes in groundwater levels. Based on the identification of risk areas through the recognition of abnormal surface deformation trends, at the district mesoscale level, this study utilized the inverse distance weighting interpolation method based on comprehensive analysis of ascending and descending orbit SAR satellite images to obtain the anomalous deformation field of a certain risk deformation area. It was discovered that changes in groundwater levels caused by tunnel construction were the main cause of abnormal deformation in this area. At the building's local scale level, this study proposes an architectural risk assessment method that combines structural damage risk with overall deformation risk, thereby enhancing the accuracy of identifying building risks. Compared to the traditional method of assessing building risks using macroscopic

基金项目：国家自然科学基金项目(52278306)；湖南省重点研发计划项目(2022SK2096)；湖南省自然科学基金项目(2023JJ70003)；湖南省水利厅水利科技项目(XSKJ2023059-31)。

作者简介：周云，出生于 1979 年，男，工学博士，教授，主要从事结构健康监测研究。E-mail:zhouyun05@hnu.edu.cn

通讯作者：陈建伟，出生于 1999 年，男，硕士研究生，主要从事结构健康监测研究。E-mail:cjw@hnu.edu.cn

收稿日期：2024-07-12

deformation indicators, the method system proposed in this study can yield more accurate and comprehensive results in building risk assessment.

Keywords: structural health monitoring; multiscale monitoring; PSI technology; IDW interpolation method; deformation pattern; building risk assessment

E-mail: cjw@hnu.edu.cn

引 言

对自然灾害的抵御能力是城市安全的重要方面,而提高城市韧性是提高城市抵御灾害能力的有效方法。城市韧性是城市系统在受到灾害等冲击时可以维持和迅速恢复其功能,并通过适应来更好应对未来冲击的能力^[1-2]。建筑是城市的重要组成部分且日趋密集,但在抵抗结构老化、不利地质条件、不规范工程施工等情况带来的安全风险时往往韧性不足,易造成严重的人员伤亡和经济损失。例如,2009年6月,上海某住宅楼整体倾倒;2022年发生的长沙4·29特别重大居民自建房倒塌事故,直接造成54人死亡;2023年6月,天津某小区多栋高层住宅发生倾斜,导致超过3000人紧急撤离;2023年7月齐齐哈尔市第三十四中学校体育馆突发发生坍塌,直接造成11人死亡。

为提升城市韧性,岳清瑞院士^[3]提出了城市安全“风险源-承灾体-减灾力”理论框架,并认为监测预警是“减灾科技”的主要方面之一。鉴于建筑在安全事故发生前可能存在较为明显的异常变形征兆,且变形往往是建筑发生倒塌的必要条件,因此面对城市建筑群提出大范围、低成本、可持续性的变形监测及风险评估方法,是提升建筑抵抗各类潜在风险能力,进而提升城市防灾韧性的重要手段。建筑变形是指建筑在承受自重和外荷载情况下,受材料特性、地基条件、结构体系等内外因素影响,为满足力与变形协调条件,发生的温度变形、收缩徐变、整体位移、不均匀沉降、挠度变化等^[4]。传统的建筑变形监测方法主要有安装原位传感器、水准测量、安装全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)监测站、摄影测量、激光雷达测量等方式^[5],虽然这些方法的精度可以达到毫米级别,但由于设备成本高、监测范围小等缺陷,无法适应大范围城市群长期变形监测的实际需求。

星载合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术是一种主动式的微波遥感测量技术,通过分析地表电磁波回波的振幅和相位信息得到地表变形。得利于卫星稳定的轨道高度和电磁波的特性,具有观测范围广、不受昼夜影响、受天气影响小等优势^[6]。目前InSAR变形观测技术已广泛应用于矿区沉降^[7]、地震变形^[8]、山体滑坡^[9]、

轨道交通变形^[10]、桥梁变形^[5]等监测领域。

针对建筑等具有较强电磁波后向散射特性的人工基础设施, Ferretti 等^[11-12]于2000年提出了永久散射体干涉测量技术(Persistent Scatterer Interferometry, PSI)。作为一种时序InSAR变形解析方法, PSI技术可以识别建筑上的若干永久散射体(PS),并获取PS点的变形时间序列,为建筑精细化变形分析奠定了基础^[13]。已有研究证明,在理论上PSI技术具有毫米级甚至亚毫米级的变形观测精度^[14],在实际的建筑变形监测中具备亚厘米级的变形观测精度^[15-17]。

大范围变形场解析方面,利用PSI技术可识别城市中存在异常变形趋势的风险区域^[18]。另一方面,通过对不同PS点变形趋势进行同质性评价,可实现风险区域等级划分^[19]。此外,对于大跨度和超高层建筑结构,PSI技术可以进行温度变形、收缩徐变、倾斜等变形的观测^[20-22];对于低层建筑群,可通过量化建筑的不均匀沉降程度评估建筑风险^[23-24]。为克服建筑PS点密度不足的问题, Bianchini 等^[25]提出利用反距离权重插值法(Inverse Distance Weight, IDW)加密变形测点。进一步地, Ezquerro 等^[26]通过将观测到建筑变形与建筑开裂损伤程度对应,提出了建筑易损性曲线; Macchiarulo 等^[27]和 Cerchiello 等^[28]将建筑简化为规则的等效梁模型,利用建筑最大应变作为风险评估指标。然而,上述方法对不同地区的不同建筑结构还不具有普适性。

当前,城市大数据涵盖方面愈发广泛,包括了卫星影像数据、地质水文信息、建筑信息等。将城市大数据与星载InSAR技术融合,深化对变形结果的解析与利用将成为未来的趋势。Farolfi 等^[29]结合InSAR变形观测技术和GNSS变形观测技术,得到了意大利地表的三维广域变形图; Liu 等^[30]利用多源SAR卫星影像数据,综合地球物理和水文地质等多方面数据,对黄河三角洲的地表变形机理进行了多方位分析; Cigna 等^[31]的研究表明,将InSAR技术与无人机监测技术融合有利于区域灾害治理; Han 等^[32]将InSAR技术与建筑信息结合,成功识别了洪涝灾害影响下变形不稳定的建筑。

综合来看,当前利用InSAR技术对城市建筑群的变形观测多停留在单一的广域尺度或建筑局域尺度,未有研究提出从城市尺度到建筑结构分析尺度的建筑

变形监测与风险评估体系。此外，现有基于 InSAR 技术的建筑风险评估多利用变形量、变形速率、不均匀沉降等宏观变形指标，与结构理论结合较为缺乏，建筑风险评估结果的可靠性不足。因此，本研究以中国台北市为例，基于星载 InSAR 技术和城市大数据的融合开展城市大范围变形场分析，针对风险区域提出改进的区域连续变形场构建方法，并基于建筑结构理论分析提出更加全面的单体建筑风险评估指标体系，以期提出一套多尺度的变形监测方法，降低建筑群监测成本，提高建筑风险评估效率和可靠性。

1 城市多尺度变形监测与分析方法

本研究总体框架如图 1 所示，将 PSI 测量技术与结构工程理论结合，并引入城市历史气温数据、地下水位数据、GNSS 监测数据、光学卫星影像、城市实景三维图像等大数据，最终实现“城市→片区→建筑”的多尺度城市建筑群变形监测与综合风险评估。

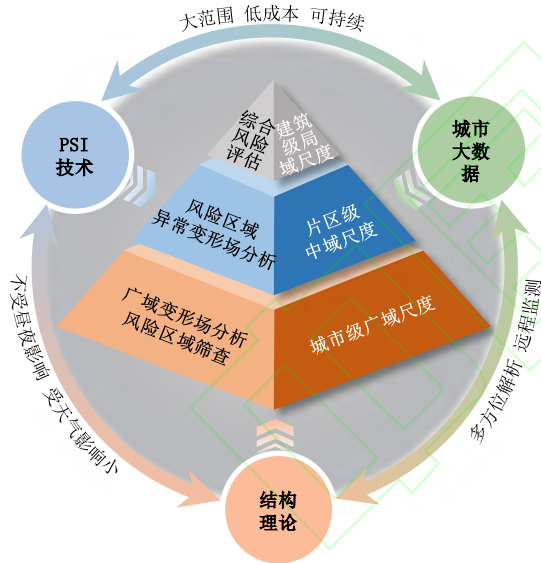


图 1 研究框架

Fig.1 Research framework

研究的总体流程如图 2 所示，其中用橙色标注了本研究的创新步骤或方法。在城市级广域尺度层面，利用 PSI 技术进行广域变形监测，并基于 GNSS 监测数据校验变形结果，之后综合地质、水文信息对广域变形场进行解析，进而根据异常变形趋势实现风险区域的识别。在片区级中域尺度层面，利用基于升降轨 SAR 影像融合分析和温度变形剔除的 IDW 插值法，开展风险区域异常变形场分析。在建筑级局域尺度层面，通过综合建筑信息和结构理论，开展建筑变形分析与风险评估。

1.1 考虑温度相位的广域变形场解析方法

PSI 技术是一种时序 InSAR 变形测量技术，通过分析一系列 SAR 卫星影像，识别散射特性随时间保持稳定的 PS 点，再基于 PS 点网络领域差分参数估计的方法求解变形时序^[6]。PSI 技术需要首先在影像集中选择一景影像为主影像，并将剩余影像与主影像配准进行干涉处理。此后，为降低大气效应干扰，需要初步选择 PS 点构建 Delaunay 三角形网络进行大气相位去除，之后再对 PS 点进行加密。PSI 技术可用式 (1) 所示的振幅稳定指数 (Amplitude Stability Index, ASI) 进行 PS 点的选择。

$$ASI = 1 - \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (1)$$

式中， σ_A 为时序振幅标准差， μ_A 为时序振幅平均值。ASI 越接近 1 说明 PS 点的后向散射特性越稳定。

为避免变形场的失真，PSI 技术应选择稳定参考点开展全局的变形反演。干涉相位模型方面，以往研究城市大范围变形时常采用线性干涉相位模型，如式 (2) 所示。但当前城市中高层建筑和大跨建筑密集，采用线性干涉相位模型将导致对建筑变形估计错误^[33]。为此，本研究采用式 (3) 所示包括温度相位的干涉相位模型^[34]，通过引入小时级的大气温度，并基于建筑材料热膨胀系数精确估计建筑的温度变形分量，进而提高建筑上 PS 点的变形反演精度。

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta T \cdot \Delta v + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B}{R \sin \theta} \cdot \Delta RTE + \Delta\phi_{res} \quad (2)$$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta T \cdot \Delta v + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B}{R \sin \theta} \cdot \Delta RTE + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta Temp \cdot \Delta Th + \Delta\phi_{res} \quad (3)$$

式中， $\Delta\phi$ 是 PS 点间的干涉相位差， λ 是电磁波的波长， ΔT 与 B 是两景影像间的时间基线和空间基线， Δv 是 PS 点间的变形速率差， R 是卫星与观测目标的斜距， θ 是雷达波的入射角， ΔRTE 是两 PS 点的高程残差， $\Delta Temp$ 是两景影像获取时刻对应的温度差， ΔTh 是两 PS 点的温度变形系数差， $\Delta\phi_{res}$ 是干涉相位残差。值得注意的是，PSI 技术直接观测到的是卫星与目标间的视线向 (Line of Sight, LOS) 变形，当所有 PS 点相对参考的水平向变形接近为零时，可以近似认为 PS 点的 LOS 向变形 D_{LOS} 均由竖直向变形产生。此时，PS 点的竖向变形 D_v 可以通过式 (4) 得到。式中， θ 为 SAR 卫星发射电磁波的入射角。

$$D_v = \frac{D_{LOS}}{\cos \theta} \quad (4)$$

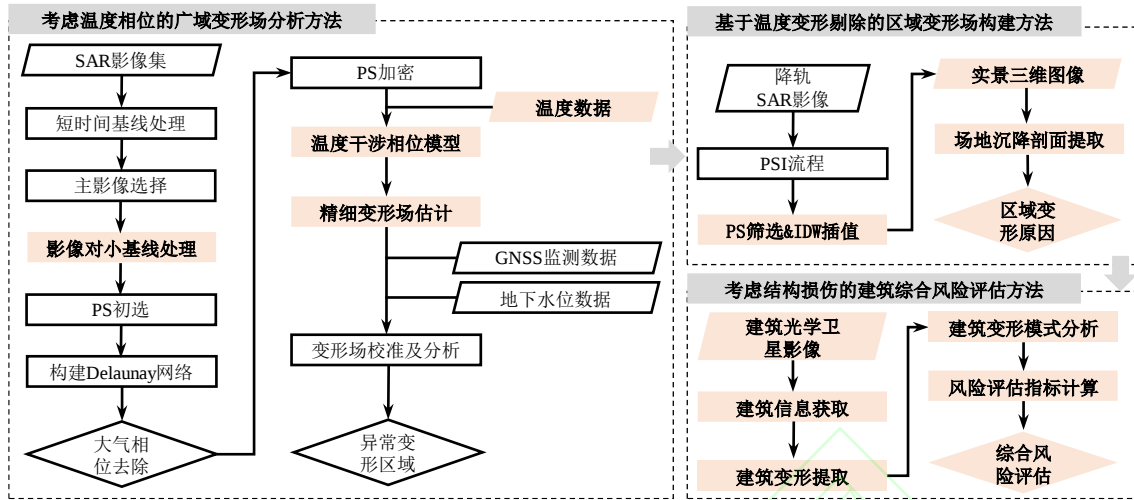


图2 研究流程

Fig.2 Research process

1.2 基于温度变形剔除的区域变形场构建方法

利用大范围、长周期的城市广域变形观测结果，可以初步识别出变形趋势明显异常的风险区域。但由于PSI技术得到的是一个由PS点构成的离散变形场，为对风险区域进行更加精细的变形分析，本研究基于反距离权重插值法（Inverse Distance Weight, IDW）获得区域内的连续变形场。已有少数研究将该方法应用于基于InSAR技术的建筑变形监测^{[15][24]}。然而，这些研究并未考虑建筑温度变形对区域变形场构建造成的影响。当区域内同时存在高层建筑时，在高层建筑立面上可能识别到一系列沿高度向分布的PS点。由于嵌岩深基础的设计，高层建筑上底部PS点始终稳定，高处PS点随温度大幅度波动，均无法真实反映区域内浅基础建筑可能存在的持续性异常变形趋势。为此，本研究提出基于温度变形剔除的IDW插值法，首先基于高度阈值和温度变形系数阈值，对高层建筑立面、大跨度建筑两端等具有明显温度变形的PS点进行剔除，再通过式（5）计算得到风险区域的连续变形场。式中， D_p 是待求点变形， S_i 是已知变形点与待求点的距离， D_i 是已知变形点的变形。

在获取区域连续变形场后，可综合卫星升降轨影像，利用图3所示的几何关系，通过式（6）、式（7）分解PS点竖直向和东西向变形。式中，下标“a”和“d”分别表示卫星升、降轨观测模式， D_{LOS} 为LOS向变形， D_e 、 D_v 分别为东向和竖直向变形， θ 和 α 分别为雷达波的入射角与卫星的航向角。需要说明的是，由于SAR卫星航向角很小，导致其对南北向变形并不敏感，因而在式中未考虑南北向变形分量。

$$D_p = \frac{\frac{1}{S_1}}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n}} \cdot D_1 + \frac{\frac{1}{S_2}}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n}} \cdot D_2 + \dots + \frac{\frac{1}{S_n}}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n}} \cdot D_n \quad (5)$$

图3 卫星观测示意

Fig.3 Satellite observation diagram

$$D_{LOS,a} = -D_e \cdot \cos \alpha_a \cdot \sin \theta_a + D_v \cos \theta_a \quad (6)$$

$$D_{LOS,d} = D_e \cdot \cos \alpha_d \cdot \sin \theta_d + D_v \cos \theta_d \quad (7)$$

1.3 考虑结构损伤的建筑综合风险评估方法

本研究基于建筑结构理论，对浅基础建筑可能的纵向变形模式进行系统性归纳，定义局部横倾角概念及计算方法考虑结构扭转风险，从结构损伤和整体变形两个方面出发，提出更加完备的建筑风险评估指标体系和相对风险计算公式，以期提高基于InSAR技术评估建筑风险的准确性。

1.3.1 建筑纵向沉降模式

在获得风险区域变形场基础上，可提取建筑沉降值绘制沿纵向的沉降曲线。依据沉降曲线的形态，本研究将建筑沉降变形分为图4所示的4种模式。沉降模式的特征与量化指标如表1所示。

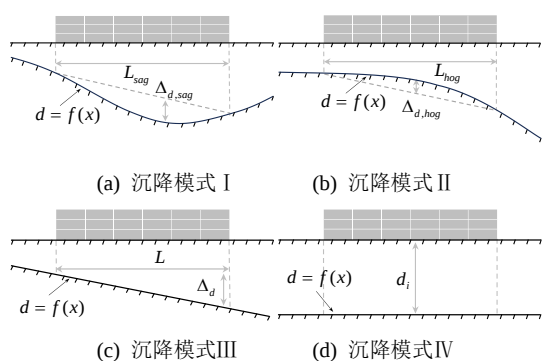


图 4 建筑沉降示意图

Fig.4 Architectural settlement diagram

表 1 建筑沉降模式

Table 1 Building settlement pattern

沉降模式	特征	量化指标	指标计算
I	$f''(x) > 0$	沉降挠度比	$\omega_d = \Delta_{d,sag} / L_{sag}$
II	$f''(x) < 0$	沉降挠度比	$\omega_d' = \Delta_{d,hog} / L_{hog}$
III	$f'(x) \neq 0$ 且 $f''(x) = 0$	纵倾角	$\eta = \Delta_d / L$
IV	$f'(x) = 0$	沉降量	d_i

注: $d = f(x)$ 为图 4 中沉降曲线的函数表达式, 沉降曲线的起点取为建筑北端或西端。

需要说明的是, 发生沉降模式 I 与沉降模式 II 变形的建筑可能产生不利于结构安全的附加弯曲应力。不同的是, 在沉降模式 II 的变形下由于土层对建筑变形的约束作用, 建筑弯曲变形的中性轴将位于结构底部^[35], 而模式 I 的弯曲中性轴位于结构中。针对这两类变形模式, 在建筑结构形式类似的情况下, 可简化 Finno 等^[36]提出的方法, 利用图 4 (a)、(b) 所示的几何关系计算沉降曲线挠度比 ω_d 与 ω_d' 衡量建筑产生不利附加应力的风险程度。相较而言, 沉降模式 III、IV 属于整体变形, 较不易产生不利结构安全的附加应力。

1.3.2 建筑横向倾斜模式

已有基于星载 InSAR 技术的建筑变形监测往往仅关注建筑的沉降结果, 然而, 对于长宽比较大的浅基础建筑, 结构可能由于场地的不均匀沉降, 导致沿纵向不均匀的横向倾斜。为此, 本研究定义了图 5 所示的局部横倾角来分析建筑横向倾斜情况, 局部横倾角通过式 (8) 计算得到。式中, θ_i 为局部横倾角, D_i 与 D_i' 为观测最终时刻建筑上部不同横截面处的两侧竖向沉降值, B 为

建筑宽度。由于已有研究表明, 对于浅基础建筑, 一方面建筑物自身刚度可以抵抗变形, 另一方面建筑物在自重作用下会略微加剧地表的自由沉降, 在两方面因素共同作用下, 建筑物的沉降值与地表沉降接近^[37]。因此, 可直接利用建筑底部和周边地面上 PS 点的变形结果求解局部横倾角。

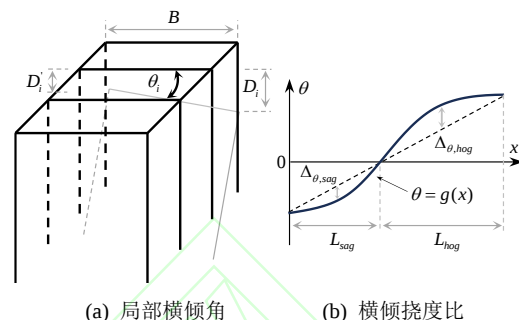


图 5 横向倾斜示意图

Fig.5 Schematic diagram of horizontal inclination

$$\theta_i = \left| \frac{D_i - D_i'}{B} \right| \quad (8)$$

表 2 依据横倾角曲线形态归纳了 3 类建筑横倾变形模式。对于发生横倾模式 I 的建筑, 结构沿纵向发生不均匀的横向倾斜, 可能产生类似扭转的效应, 由此加剧结构某些部位因纵向弯曲导致的不利附加应力。因此, 对于结构形式相近的建筑, 本研究借鉴沉降挠度比的思想, 用图 5 (b) 所示的横倾曲线挠度 ω_θ 衡量其产生扭转附加应力的风险程度。横倾模式 II 对应建筑产生整体横向倾斜, 较不易产生不利附加应力。横倾模式 III 则对应了建筑不产生横向倾斜的情况。

表 2 建筑横倾模式

Table 2 Building lateral inclination pattern

横倾模式	特征	量化指标	指标计算
I	$g''(x) < 0$ 或 $g''(x) > 0$	横倾挠度比	$\omega_\theta = \Delta_{\theta,sag} / L_{sag}$ 或 $\omega_\theta = \Delta_{\theta,hog} / L_{hog}$
II	$g(x) = \theta_i$	横倾角	θ_i
III	$g(x) = 0$	-	-

注: $\theta = g(x)$ 为横倾角沿纵向的分布曲线, θ 取向南或向东倾斜为正。

1.3.3 建筑风险评估

综合上述分析, 本研究将建筑风险评估分为“结构损伤风险”和“整体变形风险”两类。结构损伤风险是指建筑结构主体产生不利附加应力的风险, 这将直接影响结构的承载能力安全。整

体变形风险是指建筑发生过大的整体变形，进而影响建筑正常使用功能的风险。

建筑的所有风险评估指标如图 6 所示。为更加全面考虑建筑整体变形风险，此处补充了 3 个整体变形指标，包括最大沉降量、最大横倾角及近期沉降。最大沉降量 $d_{\max}$ 和最大横倾角 $|\theta_{\max}|$ 可直接从沉降曲线和横倾角曲线中提取。近期沉降 $\overline{\Delta_d}$ 取建筑近半年各点沉降增量的平均值，用于表征沉降进一步发展的趋势风险。建筑风险评估时各评估指标的占比如表 3 所示。结构损伤风险方面，考虑到建筑横倾带来的扭转效应一般较为轻微，需要附加纵向弯曲风险才可能带来较严重的后果，因此设置了相对较低的占比。整体变形风险方面，考虑建筑未来变形可能存在不可预料的非线性增大趋势，进而导致各项指标朝高风险方向发展，因而对表征未来变形风险的近期沉降量设置了较大占比。多栋建筑的相对综合风险值按式 (9) 确定。式中， R 代表风险程度， I 代表指标量值， P 代表指标占比， n 为指标数量，下标 i 和 j 分别为指标编号和建筑序号。

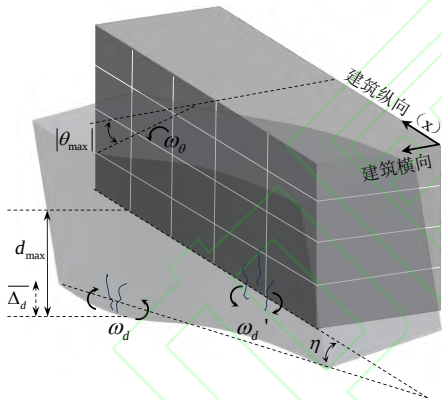


图 6 风险评估指标示意图

Fig.6 Schematic diagram of risk assessment indicators

表 3 风险评估指标占比

Table 3 Proportion of risk assessment indicators

风险类别	评估指标 I_i	占比	累积占比%
		$P_i / \%$	
结构损伤	沉降曲线挠度比 ω_d 或 ω_d'	40	50
	横倾曲线挠度比 ω_θ	10	
	最大沉降量 $d_{\max}$	10	
整体变形	纵向倾角 η	10	50
	最大横倾角 $ \theta_{\max} $	10	
	近期沉降量 $\overline{\Delta_d}$	20	

$$R_j(\%) = \sum_i^n \left(\frac{I_{ij}}{I_{i,\max}} \times P_i \right) \tag{9}$$

2 研究区域与数据处理

2.1 台北市概况

台北市是中国台湾地区的经济和文化中心，面积仅 271.8km²，但人口超过 250 万，这使得建筑分布十分密集。如图 7 所示，台北市四面环山，整体位于台北盆地之中。由于台北市地处降雨量充沛的亚热带气候区，加之盆地内覆盖大量由砾石、砂、泥为主的沉积物，导致整体地质松软。以往的观测结果表明台北市地表变形复杂，在 2007 年 1 月至 2011 年 3 月期间发生沉降^[38]，在 2011 年到 2013 年期间先沉降后隆起^[39]，在 2013 年至 2020 年期间沉降和隆起交替出现^[40-41]。在此松软地质条件下，台北市常发生滑坡、地表塌陷等灾害，对建筑群安全造成严重威胁。例如，2023 年 5 月，台北市信义区某建筑旁突发塌陷^[42]；2023 年 8 月，台北市大直区某建筑因受周围基坑施工，导致其整体沉陷近一层楼高度^[43]。

2.2 大数据的获取与用途

本研究收集的大数据概况如表 4 所示。其中，SAR 影像、气温数据用于获取建筑变形，GNSS 监测数据、地下水位数据分别用于 PSI 变形结果校验和分析，光学卫星影像和城市实景三维图像用于风险评估过程中的区域勘察和建筑信息获取。其中，SAR 影像来自 Sentinel 卫星，升降轨卫星的观测视角及各测站的位置分布如图 7 所示。为校核 Google Earth 在台北地区的光学卫星影像精度，本研究重复量取了台北松山机场的跑道宽度，结果处于 59.80m-60.20m 之间，与实际值 60m 相比偏差小于 1m。

表 4 大数据概况

Table 4 An overview of big data

序号	类别	来源	数据时间
1	SAR 卫星影像	阿拉斯加卫星设施	2019/1-2024/2
2	台北市气温数据	台北松山机场	2019/1-2024/2
3	GNSS 监测数据	台湾大地模型平台	2019/1-2021/12
4	地下水位数据	台北经济部水利署	2019/1-2023/12
5	光学卫星影像	Google Earth	2024/2/15
6	城市实景三维图像	Google Map	2018/11-2023/3

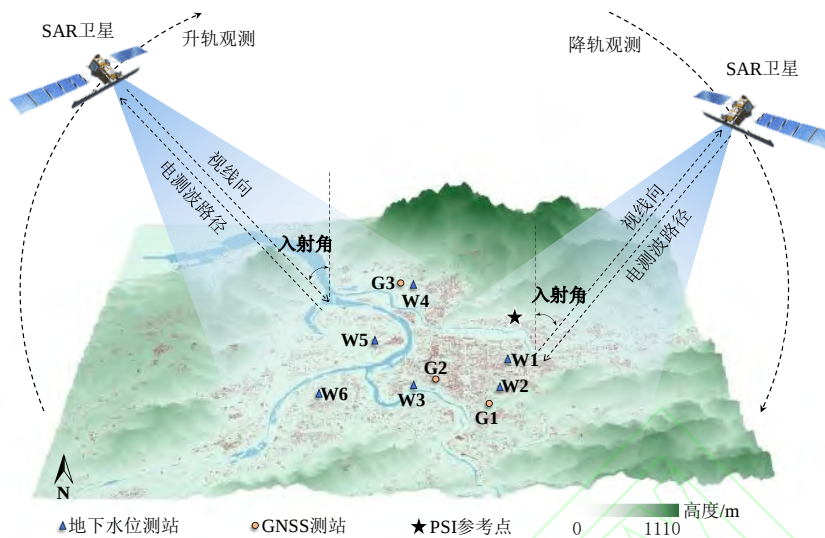


图 7 台北市地形与卫星观测示意图

Fig.7 Topographic map of Taipei City

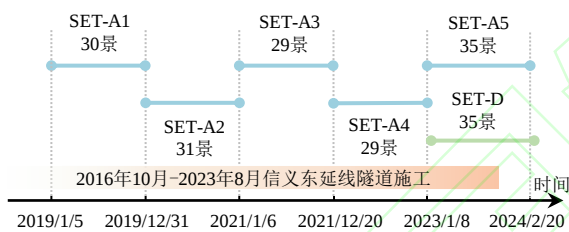


图 8 影像集时间跨度

Fig.8 Time span of the image dataset

2.3 SAR 影像处理

为提高各干涉影像对的时间相干性，从而提高 PS 点密度，本研究首先将 2019 年 1 月至 2024 年 2 月的 SAR 影像进行短时间基线处理。最终，总影像集被划分为 5 个升轨影像子集 (SET-A1~SET-A5)，和 1 个降轨影像子集 (SET-D)。各影像子集覆盖的时间跨度及后续分析涉及的一条隧道施工时间如图 8 所示。此后，为提高 PSI 流程的解算精度，本研究先选择 0.75 的振幅稳定系数作为 PS 点初选的阈值，在大气干扰去除后将系数降低为 0.7 进行 PS 点的加密。这种阈值处理方法在 Lin 等的研究中被证明是可靠的^[41]。本研究将所有影像子集的变形求解参考点选择在如图 7 所示的同一位置，并利用 1.1 节介绍的方法求解变形场。

3 城市级广域尺度变形场分析结果

图 9 展示了利用升轨影像求解得到的台北市 2019 年 1 月至 2024 年 2 月的分阶段广域变形结

果，红色和蓝色分别代表远离和靠近卫星的 LOS 向变形。图 9 中每个带颜色的像素点为识别到的 PS 点，可见各时间段内 PS 点的密度均能够清晰表征台北市广域变形场。PS 点主要在建筑、桥梁、道路、河堤等处被识别到，构成的地表轮廓与光学卫星影像吻合良好，这说明了 PS 点的经纬度坐标的准确性。

3.1 台北市广域变形结果与验证

如图 9 所示，台北市在 2019 年至 2020 年期间地表发生大范围远离卫星的 LOS 向变形，2021 年至 2024 年展现出靠近卫星的 LOS 向变形趋势，呈现出不稳定趋势。其中，2019 年至 2020 年的变形结果与 Lin 等^[41]的观测结果一致，这验证了 PSI 技术求解流程的正确性。

为进一步验证 PSI 技术变形求解的准确性，本研究利用图 7 中 3 个 GNSS 监测站记录的变形结果进行结果验证。为保证 GNSS 测站具有代表性，3 个测站分别选自台北市的北部、中部和南部，测站的详细信息如表 5 所示。可见，3 个测站根据多年观测数据统计得到的南北向和东西向变形速率十分接近。由于 PSI 技术求解的是相对于参考点的相对变形，因此，东西和南北两个变形分量在 PSI 的变形结果中被自然剔除。此时，PSI 观测的地表竖直变形可近似由式 (4) 计算得到。由于 GNSS 测站在 2021 年之后的数据存在缺失，研究将 2019 年至 2021 年期间 PSI 计算的变形结果进行了对比验证。对比结果如图 10 所示，PSI 变形结果与 G1、G2、G3 测站所记录变形的平均偏差

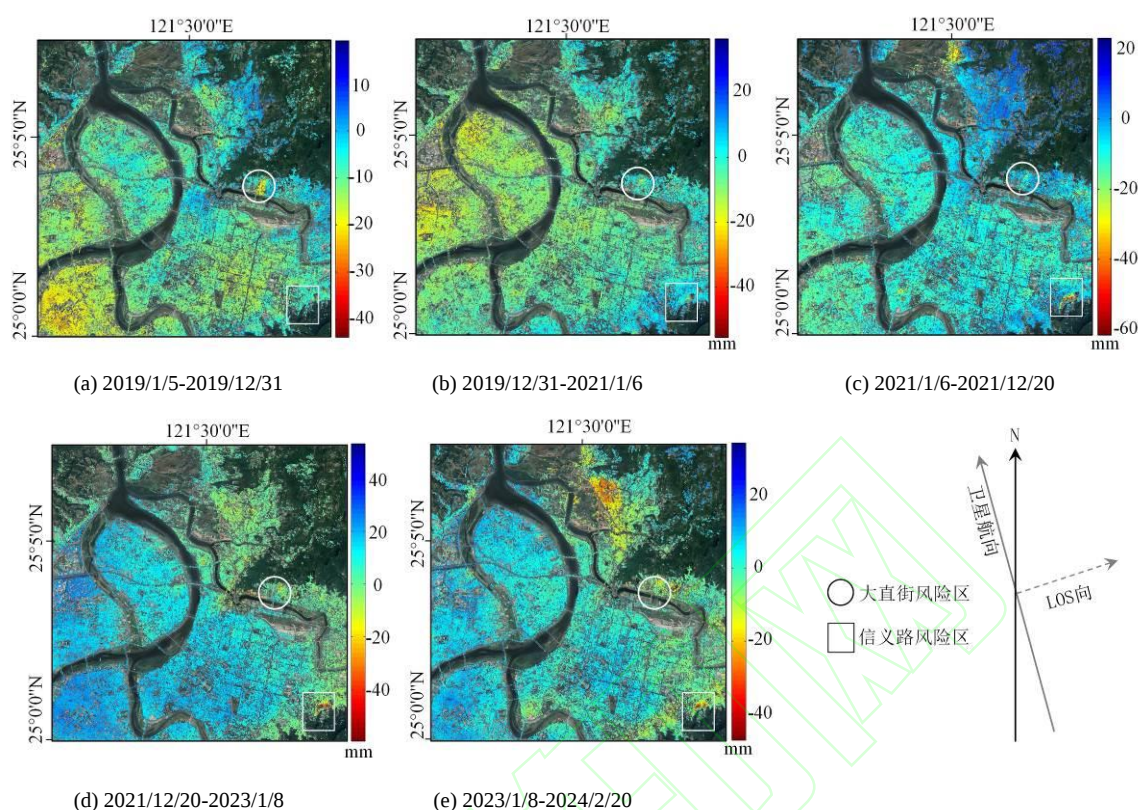


图 9 历年地表 LOS 向总变形量

Fig.9 The cumulative surface deformation along the LOS over years

表 5 GNSS 监测站信息

Table 5 GNSS monitoring station information

编号	坐标	启用时间	$V_n(\text{mm/y})$	$V_e(\text{mm/y})$
G1	25.0213° N, 121.5368° E	2015	-11.33	33.27
G2	25.00377° N, 121.5139° E	2012	-9.64	33.09
G3	25.1336° N, 121.4988° E	2005	-10.89	32.81

注：数据提取时间为 2024 年 3 月 25 日。

较小，分别为 2.23mm、2.76mm 和 2.54mm。偏差主要来源于 SAR 卫星观测时刻与 GNSS 测站数据的记录时刻不同，且 PS 点的位置与测站的位置并不完全重合。综合来看，PSI 技术观测到的竖向变形与 GNSS 测站记录的竖向变形趋势十分吻合，加之已有研究对 PSI 技术精度的验证结果，可认为所得台北市广域变形结果具有相当的置信度。

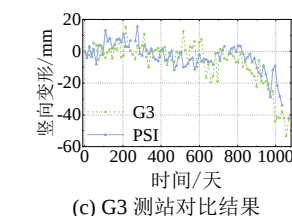
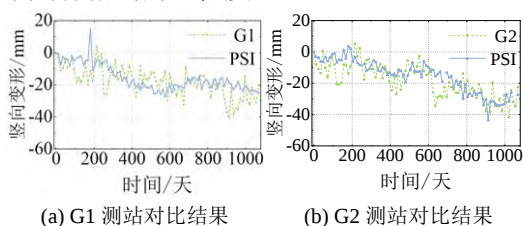


图 10 PSI 与 GNSS 的变形对比

Fig.10 Comparison of deformation between PSI and GNSS

3.2 地下水位与 PSI 变形结果对比

图 11 给出了各地下水位测站 2019 年至 2023 年历史水位数据与临近 PS 点 LOS 向变形数据的对比结果。各地下水位测站的详细信息如表 6 所示。从图 11 可见，各测站地下水位变化与地表 LOS 向变形均展现出高度的正相关性。综合考虑台北市降雨量充沛且河系多从四周山脉向中心盆地汇聚。因此，可以推断 3.1 节所述台北市地表不稳定的变形趋势，是降水和地表水对地下水的动态补充，造成了地下水位在时空上的动态起伏，进而导致了地层中松软沉积层在时空上产生了大范围、长时间的不稳定波动。

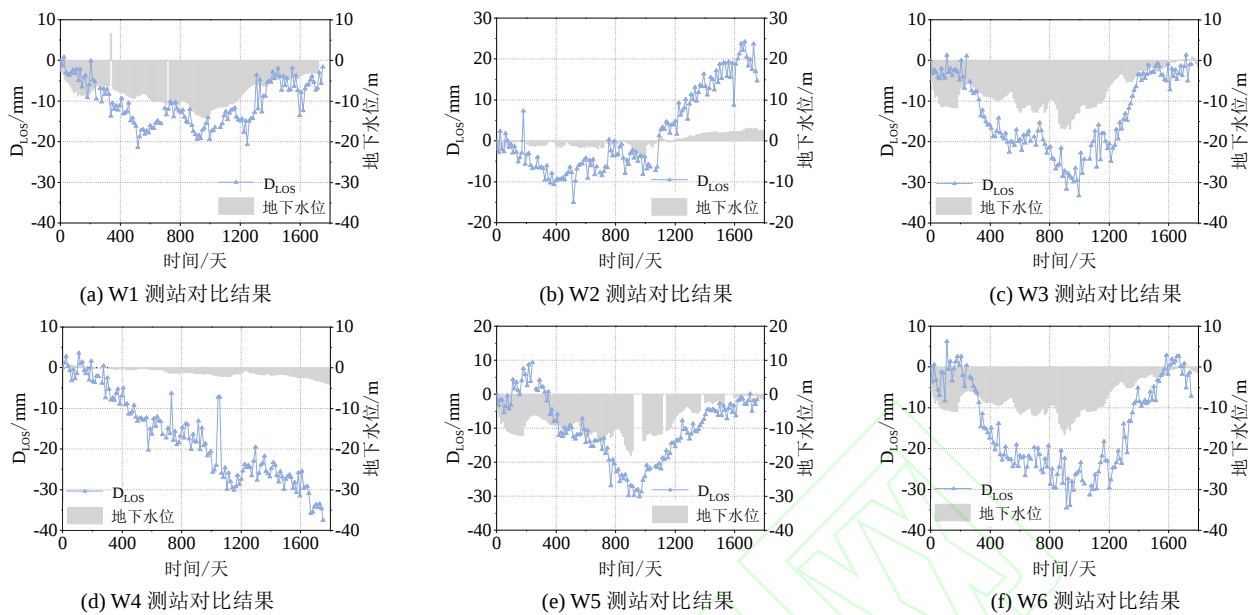


图 11 LOS 向变形与历史地下水位对比

Fig.11 Comparison of LOS deformation with historical groundwater levels

表 6 地下水位测站信息

Table 6 Groundwater level monitoring station information

测站编号	坐标	启用时间	井深/m
W1	25.00387° N, 121.5580° E	2005	89.56
W2	25.0255° N, 121.5486° E	2005	50.00
W3	25.0203° N, 121.5043° E	2007	85.00
W4	25.1072° N, 121.4998° E	2005	59.00
W5	25.0606° N, 121.4881° E	1994	107.35
W6	25.0204° N, 121.4703° E	2005	79.00

壤软弱，深层岩层坚硬，且地表施工区域狭窄。因施工难度较大，该工程于 2016 年开始施工，直至 2023 年 7 月末才完成隧道的盾构掘进作业。

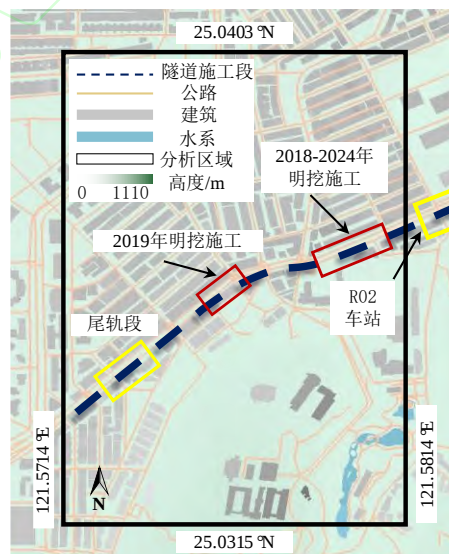


图 12 施工区域概况

Fig12 Overview of the construction area

4 片区级中域尺度异常变形场分析结果

4.1 异常变形区域识别

图 9 中分别用圆形和矩形标注了 2 个存在明显异常变形的风险区域。大直街风险区在观测的 5 年时间里呈现出持续沉降的变形趋势，该区域内的一栋建筑在 2023 年 8 月发生了严重的倾斜，导致建筑一层直接陷入地下^[43]。信义路风险区变形趋势与大直街风险区类似，在观测时间里持续沉降，可能面临较大风险。

4.2 信义路风险区变形场分析

基于光学卫星影像的勘察表明，该区域内多为低层浅基础建筑，因此适用于 1.3 节提出的分析方法。

4.2.1 区域概况

如图 12 所示，信义路风险区对应了台北市“信义东延线”的 CR285 隧道施工标段。该施工段全长约 1.42km，除车站、通风井等必要处采用明挖施工外，其余工段均采用盾构掘进的方式施工。该地区浅层土

4.2.2 隧道施工与地表变形关系

由于 Sentinel 卫星降轨影像的缺失，研究无法利用升降轨影像融合的方法获取区域全过程的真实竖直变形。考虑隧道施工末期沉降较小，轻微的东西向变形可能成为 LOS 向变形的主导因素。因此，研究选取了隧道盾构施工末期 2023 年 1 月至 2024 年 2 月的降轨影像数据，通过 1.2 节介绍的方法，得到了区域内的东向变形场，结果如图 13 所示。可得隧道施工末期两个时间段内场地的东向变形均值较小，仅为

0.67mm 和-2.17mm。因此，后续研究直接利用升轨影像数据计算2019年至2022年该区域的竖向变形结果。

图 14 给出了信义路风险区变形场演变过程，表 7 总结了区域内各时间节点的沉降特征。综合来看，该区域的沉降有以下特征：一是沉降中心不在隧道沿线的正上方；二是沉降场发展的时空起点与该隧道明挖施工的时空起点相对应；三是沉降条带贯通的时间早于隧道贯通的时间；四是隧道贯通后沉降场存在收敛趋势。因此，综合台北地表变形受地下水位影响较大的分析，可以推断是由于隧道明挖施工改变了此处地下水的空间分布，加之隧道长期掘进作业对原本松散的地表沉积层造成扰动，最终在土层失水、压实情况下，地表发生了大范围沉降。

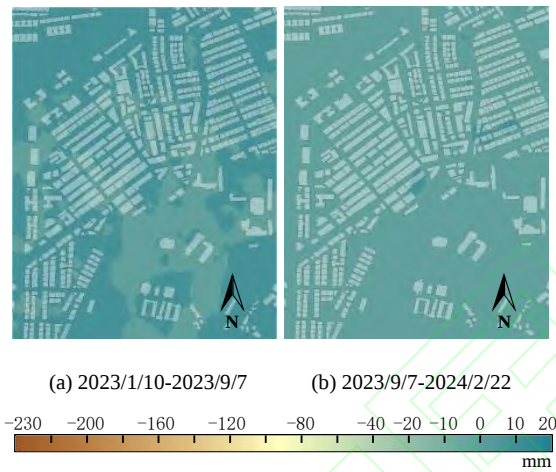


图 13 区域内东向变形场
Fig.13 Eastward deformation field within the region

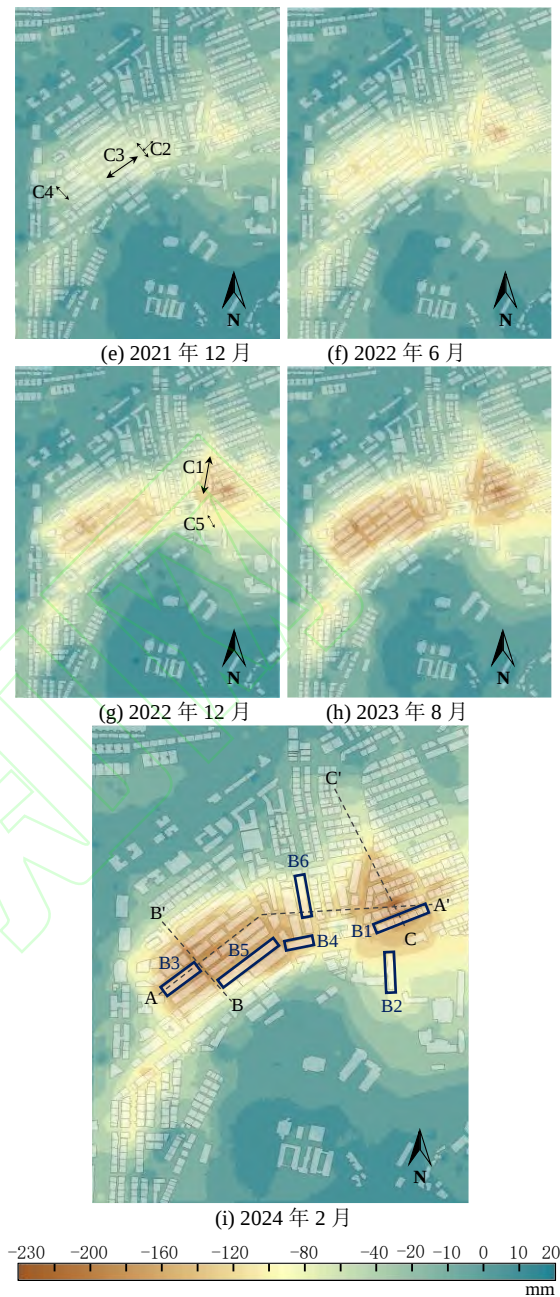
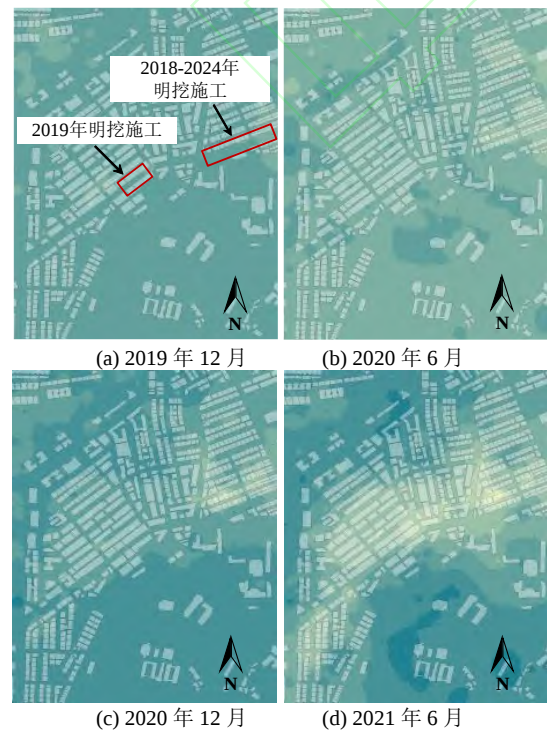


图 14 变形场演变过程
Fig.14 Evolution process of deformation field

表 7 沉降特征统计

Table 7 Statistics of Subsidence Characteristics			
时间	最大沉降/mm	增量/mm	特征
2019/12	-21.73	-21.73	局部片状沉降
2020/6	-43.25	-21.52	片状沉降扩散
2020/12	-66.64	-23.39	片状沉降扩散
2021/6	-90.60	-23.96	形成条带状沉降
2021/12	-125.12	-34.52	沉降条带蔓延、加深
2022/6	-166.38	-41.26	沉降条带蔓延、加深
2022/12	-194.72	-28.34	沉降条带蔓延、加深

2023/8	-219.09	-24.37	沉降条带蔓延、加深
2024/2	-230.35	-11.26	沉降带形态趋于稳定

4.2.3 实景勘察结果

借助 Google Map 平台存储的城市历史实景三维图像可以进行区域实景勘察。在观测时间内，勘察共发现了如图 15 所示的 5 处裂缝（C1~C5）。依据裂缝的发现时间和位置，裂缝被标记在图 14 的沉降场中。

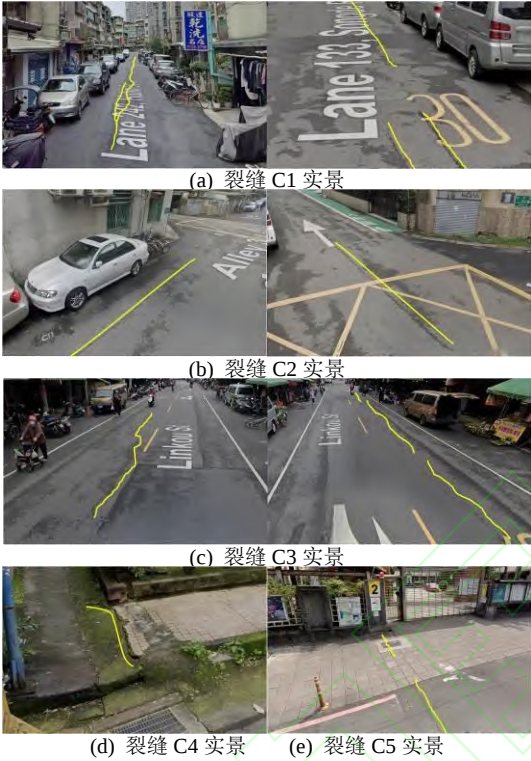


Fig.15 Realistic depiction of road surface cracks

4.3 信义路风险区沉降剖面

图 16 展示了图 14（i）中 3 个剖面的沉降值，并标注了剖面上裂缝与建筑的位置。由图 16（a）可见，隧道沿线的北侧发展形成了两个明显的沉降漏斗，且东侧的沉降量明显大于西侧。这主要时由于东侧隧道明挖施工的范围更大、持续时间更长，导致土层稳定性和地下水位分布受到了更大的影响。

表 8 进一步统计了各沉降剖面的特征信息。可见，沉降漏斗的最大年沉降速率超过了 45mm/y，若按 Ezquerro 等^[26]提出的砖石结构易损性曲线评估建筑损伤，沉降漏斗附近建筑的损伤概率超过了 90%。然而，除新闻报道建筑 B2 具有明显的开裂外，在城市历史实景三维图像的勘察中并未发现其它建筑存在普遍的表现损伤。这说明，若使用单一的沉降速率评价建筑的结构损伤可能存在片面性。鉴于沉降后的场地最大坡度仅为 1/366，说明虽然该区域的累积沉降量较大，

但是形成的地表坡度并不大，这可能是大部分建筑未发生明显开裂损伤的原因之一。此外，明显可见 C1、C2、C3 裂缝的分布位置处于沉降曲线的拐点处，说明地面裂缝发展的主要原因是地表的坡度变化对沥青路面形成了一定的挤压或拉伸。

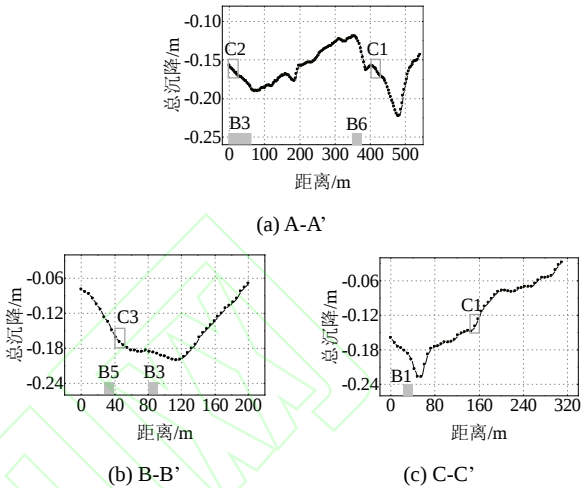


图 16 区域沉降剖面
Fig.16 Subsidence profile within the region

表 8 沉降剖面特征统计

Table 8 Statistics of settlement profile characteristics				
剖面	最大沉降量 /mm	最大沉降速率 /mm·y ⁻¹	最大坡度 区间	最大 坡度
A-A'	223	44.60	365m~387m	1/593
B-B'	200	40.00	9m~41m	1/436
C-C'	227	45.40	55m~73m	1/366

5 建筑级局域尺度变形分析与风险评估结果

5.1 建筑变形分析

5.1.1 建筑信息

为验证本研究所提出风险评估指标的可靠性，研究沿隧道沿线及两个沉降漏斗周围，选取了包括 B1、B2 在内的 6 栋层高相近但长宽比不同的建筑进行变形分析与风险评估。建筑位置见图 14（i），建筑实景如图 17 所示，建筑的基本信息见表 9。此前，新闻报道在隧道施工期间，B1 与路面出现超过 10cm 的沉降差^[44]。图 18（a）所示实景影像证明了这一报道，建筑 B1 的地坪 2018 年时高于路面，但到 2022 年时明显低于路面。此外，如图 18（b）所示，在 2023 年期间发生了约 50mm 的沉降，结构上部出现明显开裂^[45]。



图 17 建筑实景图像

Fig.17 Realistic images of buildings

表 9 建筑信息

Table 9 Building information

建筑编号	结构层数	长度/m	宽度/m
B1	4	105	17
B2	3	93	14
B3	4	67	13
B4	4	57	15
B5	4	140	13
B6	4	60	13

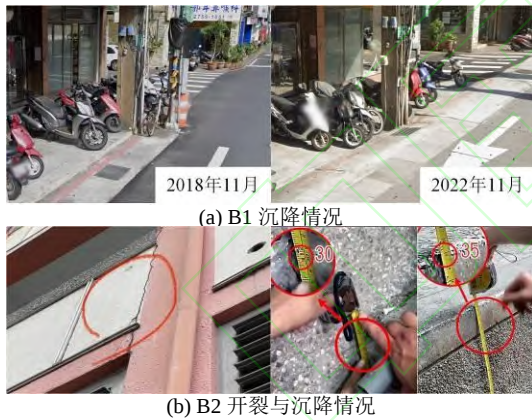


图 18 B1、B2 的沉降与裂缝

Fig.18 Deformation and cracking of B1 and B2

5.1.2 建筑沉降模式

从图 14 (i) 提取 6 栋建筑沉降值并绘制建筑沿纵向的沉降曲线，结果如图 19 所示。可见，所有建筑都具有明显的整体下沉趋势。表 10 依据 1.3.1 节的分析，进一步统计了建筑的沉降情况。

对 B1 而言，最终的沉降曲线具有明显的沉降模式 I 特征，即存在纵向弯曲变形。建筑 B2 沉降曲线具有明显的模式 II 特征，其在 2023 年期间观测到的平均沉降为 54mm，这与新闻报道该建筑在 2023 年内发生了约 50mm 沉降接近。从产生附加应力角度考虑，可以推断 B1 产生了上部受压、下部受拉的不利附加

应力产生。其未发现明显表观裂缝的原因在于，建筑底层外侧几乎没有沿纵向布置的填充墙，这在一定程度上释放了拉应力。对于结构上部的附加压应力，由于混凝土和砖砌体抗压强度较大，因此不易产生明显开裂。虽然 B2 的沉降挠度比较 B1 小，但由于其弯曲变形的中性轴位于结构底部，结构横断面上存在全截面受拉的附加应力，反而可能存在更明显的开裂损伤。图 18 (b) 所示的 B2 建筑表观开裂结果证明了这一推断。其裂缝产生的原因可能是结构上部受拉后，填充墙与柱子之间的附加拉应力超过了砂浆的粘结强度造成的。此外，在属于沉降模式 III 的 4 栋建筑中，B3、B5 和 B6 发生整体向东的倾斜，B4 则发生整体向西的倾斜。从结构不附加应力角度考虑，这 4 栋建筑均不具有显著的结构损伤风险，其主要风险来自于过大的整体变形对建筑正常使用功能造成的影响。

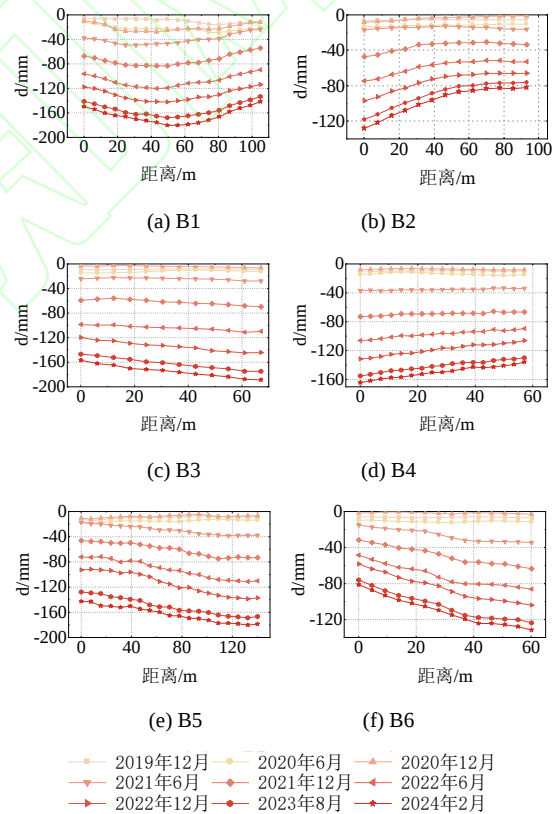


图 19 建筑沉降曲线

Fig.19 Building settlement curve

表 10 建筑沉降变形结果

Table 10 Building settlement deformation results

建筑编号	沉降模式	$d_{\max}$ /mm	$\bar{\Delta}_d$ /mm	η /rad	ω_d 或 ω_d'
B1	I + IV	180	10.53	1/17513	1/3038
B2	II + IV	128	7.27	1/2041	1/6649
B3	III + IV	188	12.81	1/2094	-

B4	III+IV	164	8.56	1/2036	-
B5	III+IV	178	12.62	1/4000	-
B6	III+IV	132	5.96	1/1176	-

5.1.3 建筑横倾模式

依据 1.3.2 节的定义，图 20 给了各建筑横倾角曲线，表 11 统计了横倾角相关的变形指标。本研究对最大横倾角大于 1/1000 的建筑计算了横倾挠度比，这一量级的倾角可使宽度大于 10 米的建筑在横向两端产生厘米级的沉降差。从结果可见，虽然 B5 发展了较大的横倾角，但最大横倾挠度比却较小。这再次说明了单一指标评估风险的局限性。此外，B2、B3 与 B6 的最大横倾角均小于 1/1000，这对应了横倾模式 III 的特征，意味着建筑几乎不存在横向倾斜。

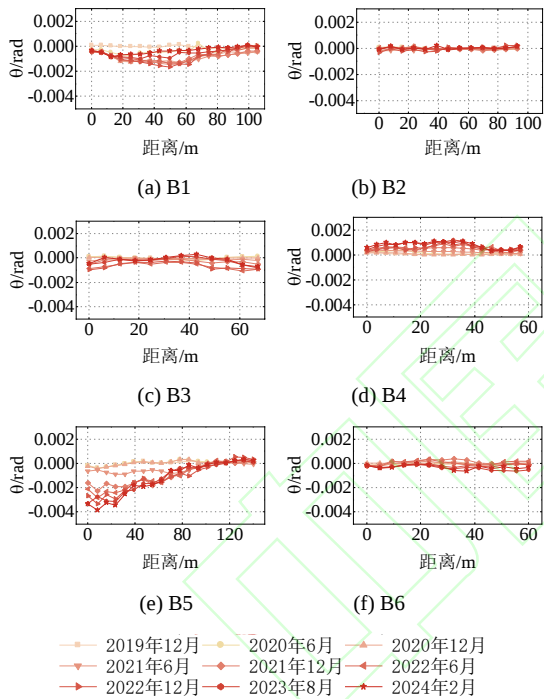


图 20 建筑局部横倾角

Fig.20 Local lateral tilt angle of the building

表 11 建筑横倾结果

Table 11 Building lateral inclination results

建筑编号	横倾模式	$ \theta_{\max} / rad$	$\omega_{\theta, \max} / rad \cdot m^{-1}$
B1	I	1/611	1.33×10^{-5}
B2	III	1/3571	-
B3	I	1/1155	-
B4	I	1/840	2.62×10^{-5}
B5	I	1/263	9.17×10^{-6}
B6	III	1/1567	-

5.2 建筑风险评估结果

图 21(a)和图 21(b)分别给出了不考虑结构损伤和考虑结构损伤的建筑风险评估结果，其中不考虑结构损伤的风险评估方法是已有基于星载 InSAR 技术开展建筑风险评估的常用方法。从评估结果可见，若如不考虑结构的损伤风险，将导致新闻报道损伤和变形明显的 B1、B2 两栋建筑的风险程度被严重低估，而考虑结构损伤风险后的图 21(b)则能很好识别出这两栋建筑的高风险。这表明，本研究提出的建筑变形风险评估指标可以有效克服已有方法的片面性，提高基于星载 InSAR 技术开展建筑风险评估的可靠性。

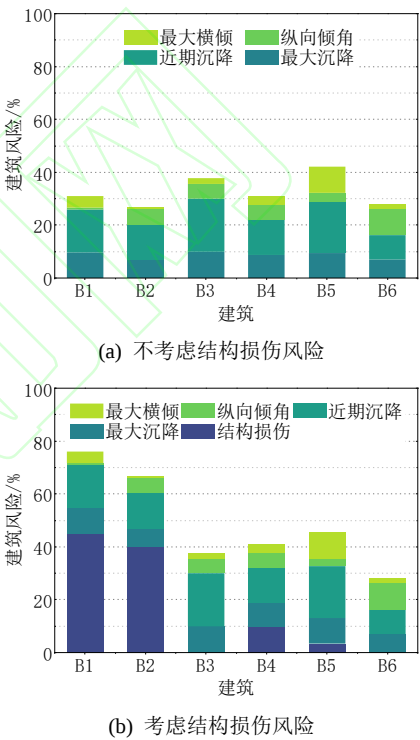


图 21 建筑风险评估结果

Fig.21 Results of building risk assessment

6 结论

本研究将星载 InSAR 技术与建筑结构理论相结合，融合多源城市数据，提出了一种具有较高可靠性和可行性的城市建筑群多尺度变形监测与综合风险评估方法。该方法有助于从多方面分析建筑因异常变形导致的风险，并提高现有基于星载 InSAR 技术进行建筑风险评估的可靠性。相关方法的应用有望加强城市建筑群抵抗潜在风险的韧性，并为未来城市建设大范围、低成本、可持续的建筑群变形监测及风险预警体系提供理论依据和实践经验。主要结论如下：

(1) 在城市级广域尺度变形分析方面，研究证明，通过对 SAR 影像进行小时时间基线处理，并采用考虑温度相位的干涉相位模型，可以准确获取长周期城

市变形场。此外, PSI 技术与城市大数据融合, 有利于揭示城市大范围变形场的产生机理与演变趋势, 并有效识别变形趋势异常的潜在风险区域。

(2)在片区级中尺度异常变形场分析方面, 研究表明, 利用基于升降轨 SAR 影像融合分析和温度变形剔除的 IDW 插值法, 可以准确获取风险区域的精细化异常变形场及其演化过程。研究同时表明, 综合城市历史实景三维图像勘察结果、历史施工信息及区域地质水文资料等数据, 可以从人为因素和自然因素的影响出发, 深入解析异常变形场的产生原因。

(3)在建筑级局域尺度的变形分析与风险评估方面, 研究归纳了建筑 4 类纵向沉降模式和 3 类横向倾斜模式, 提出了建筑综合风险评估方法。结果表明, 本研究提出的方法有利于克服利用单一宏观变形指标衡量建筑风险时所存在的片面性, 提升建筑风险识别精度。同时证明, 相较于传统地面人工监测, 本研究提出的多尺度变形监测与风险评估方法有利于提高监测效率、减少监测成本, 并有望实现建筑事故前预警。

参考文献

- [1] 方东平, 李在上, 李楠. 城市韧性——基于情景推演的跨系统跨维度研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(8): 1-8. (Fang Dongping, Li Zaishang, Li Nan, et al. Urban resilience: a cross-system and cross-dimension study based on scenario deduction[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(8): 1-8. (in Chinese))
- [2] 翟长海, 岳清瑞, 谢礼立. 抗震韧性城市评估与构建[J]. 建筑结构学报, 2024, 45 (5): 1-13. (Zhai Changhai, Yue Qingrui, Xie Lili. Evaluation and construction of seismic resilient cities[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45 (5): 1-13. (in Chinese))
- [3] 岳清瑞, 陆新征, 许镇, 等. 城市安全“风险源-承灾体-减灾力”理论框架 [J/OL]. 工程力学, 1-9 [2024-04-03]. (Yue Qingrui, Lu Xinzheng, Xu Zhen, et al. The "risk source-risk exposure-mitigation force" theoretical framework for urban safety[J]. Engineering Mechanics, 1-9[2024-04-03]. (in Chinese))
- [4] Van Waning H W. A feasibility study of building monitoring and forensic engineering with Interferometric Synthetic Aperture Radar[D]. Delft University of Technology, 2014.
- [5] 周云, 郝官旺, 危俊杰, 等. 基于 PS-InSAR 技术的大跨度桥梁结构变形监测综述 [J/OL]. 工程力学, 1-4[2024-03-29]. (Zhou Yun, Hao Guanwang, Wei Junjie, et al. Review of psinsar-based long-span bridges structural deformation monitoring[J/OL]. Engineering Mechanics, 1-4[2024-03-29]. (in Chinese))
- [6] 刘国祥, 陈强, 罗小军, 等. InSAR 原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 1. (Liu Guoxiang, Chen Qiang, Luo Xiaojun, et al. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) principle and applications [M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese))
- [7] Wang L, Teng C, Jiang K, et al. D-InSAR monitoring method of mining subsidence based on boltzmann and its application in building mining damage assessment[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(1): 353-370.
- [8] 缪阿丽, 祝涛, 张艺, 等. 2021 年青海玛多 7.4 级地震的江苏流体井水位同震响应特征[J]. 地震研究, 2023, 46(1): 58-73. (Miao Ali, Zhu Tao, Zhang Yi, et al. The coseismic step-rising of the groundwater level in Jiangsu caused by the Maduo MS7.4 Earthquake in 2021[J]. Journal of Seismological Research, 46(1): 68-73. (in Chinese))
- [9] Noviello C, Verde S, Zamparelli V. Monitoring buildings at landslide risk with sar: a methodology based on the use of multipass interferometric data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2020, 8(1): 91-119.
- [10] 秦晓琼, 杨梦诗, 王寒梅, 等. 高分辨率 PS-InSAR 在轨道交通形变特征探测中的应用[J]. 测绘学报, 2016, 45(6): 713-721. (Qin Xiaojiong, Yang Mengshi, Wang Hanmei, et al. Application of high-resolution PS-InSAR in deformation characteristics probe of urban rail transit[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(6): 713-721. (in Chinese))
- [11] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2202-2212.
- [12] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 39(1): 8-20.
- [13] 李德仁, 廖明生, 王艳. 永久散射体雷达干涉测量技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29(8): 664-668. (Li Deren, Liao Mingsheng, Wang Yan. Permanent scatterer radar interferometry measurement technology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29 (8): 664-668. (in Chinese))
- [14] Ferretti A, Savio G, Barzaghi R, et al. Submillimeter accuracy of InSAR time series: experimental validation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(5): 1142-1153.
- [15] Karila K, Karjalainen M, Hyypää J, et al. A comparison of precise leveling and persistent scatterer SAR interferometry for building subsidence rate measurement[J]. ISPRS International Journal of Geo-information, 2013; 2(3): 797-816.
- [16] Yang K, Yan L, Huang G M, et al. Monitoring building deformation with InSAR: experiments and validation[J]. Sensors, 2017, 16(12): 2182.
- [17] Osmanoglu B, Dixon T H, Wdowinski S. Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 13(1): 1-12.
- [18] Ma P F, Wang W X, Zhang B W. Remotely sensing large- and small-scale ground subsidence: A case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of

- China[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 231: 111282.
- [19] Ciampalini A, Bardi F, Bianchini S. Analysis of building deformation in landslide area using multisensor PSInSARTM technique[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 33: 166-180.
- [20] Rodríguez-Antuña I, Martínez-Sánchez J, Cabaleiro M, et al. Anticipating the collapse of urban infrastructure: a methodology based on earth observation and MT-InSAR[J]. Remote Sensing, 2023, 15(15): 3867.
- [21] Gernhardt S, Bamler R. Deformation monitoring of single buildings using meter-resolution SAR data in PSI[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 73(SI): 68-79.
- [22] Ma P F, Lin H, Lan H X, et al. Multi-dimensional SAR tomography for monitoring the deformation of newly built concrete buildings[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 106: 118-128.
- [23] Lin Y Z, Cao W X, Shi Z Q, et al. Evaluation of post-tunneling aging buildings using the InSAR nonuniform settlement index[J]. Remote Sensing, 2023, 15(14): 3467.
- [24] Drougkas A, Verstryng E, Van Balen K, et al. Country-scale InSAR monitoring for settlement and uplift damage calculation in architectural heritage structures[J]. Structural Health Monitoring-an International Journal, 2022, 20(5): 2317-2336.
- [25] Bianchini S, Pratesi F, Nolesini T, et al. Building deformation assessment by means of persistent scatterer interferometry analysis on a landslide-affected area: the Volterra (Italy) case study[J]. Remote Sensing, 2015, 7(4): 4678-4701.
- [26] Ezquerro P, Del Soldato M, Solari L, et al. Vulnerability assessment of buildings due to land subsidence using InSAR data in the ancient historical city of Pistoia (Italy)[J]. Sensors, 2020, 20(10): 2749.
- [27] Macchiariulo V, Milillo P, DeJong M J, et al. Integrated InSAR monitoring and structural assessment of tunnelling-induced building deformations[J]. Structural Control & Health Monitoring, 2021, 28(9): e2781.
- [28] Cerchiello V, Tessari G, Velterop E, et al. Building damage risk by modeling interferometric time series[C]// 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2016: 7334-7337.
- [29] Farolfi G, Piombino A, Catani F, et al. Fusion of GNSS and Satellite Radar Interferometry: Determination of 3D Fine-Scale Map of Present-Day Surface Displacements in Italy as Expressions of Geodynamic Processes[J]. Remote Sensing, 2019, 11(4): 394.
- [30] Liu Y L, Zhang Y, Zhao F Q, et al. Multi-Source SAR-Based Surface Deformation Monitoring and Groundwater Relationship Analysis in the Yellow River Delta, China[J]. Remote Sensing, 2023, 15(13): 3290.
- [31] Cigna F, Balz T, Tapete D, et al. Exploiting satellite SAR for archaeological prospection and heritage site protection[J]. GEO-Spatial Information Science, 2023.
- [32] Han L, Cao L H, Wu Q F, et al. Identification of Surface Deformation-Sensitive Features under Extreme Rainfall Conditions in Zhengzhou City Based on Multi-Source Remote Sensing Data[J]. Applied Sciences-Basel, 2023, 12(24): 13063.
- [33] Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-González M, et al. Measuring thermal expansion using X-band persistent scatterer interferometry[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 100: 84-91.
- [34] Monserrat O, Crosetto M, Cuevas M, et al. The thermal expansion component of persistent scatterer interferometry observations[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 8(5): 864-868.
- [35] Burland J B, Wroth C P. Settlement of buildings and associated damage[C]// Conference on Settlement of Structures. 1975.
- [36] Finno R J, Voss F T, Rossow E, et al. Evaluating damage potential in buildings affected by excavations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(10): 1199-1210.
- [37] 王卫东, 徐中华. 预估深基坑开挖对周边建筑物影响的简化分析方法[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 32-38. (Wang Weidong, Xu Zhonghua. Simplified analysis method for evaluating excavation-induced damage of adjacent buildings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(Suppl.1): 32-38. (in Chinese))
- [38] Ng A H, Ge L, Li X. 2016. Land deformation mapping with ALOS PALSAR data: a case study of Taipei City[C]// 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2016: 6051-6054.
- [39] Tung H, Chen H Y, Hu J C, et al. Transient deformation induced by groundwater change in Taipei metropolitan area revealed by high resolution X-band SAR interferometry[J]. Tectonophysics, 2016, 692: 265-277.
- [40] Lin S H, Hu J C. Analysis of groundwater-induced deformation and hydraulic parameter in Taipei basin by InSAR measurement and numerical Model[C]// 20th EGU General Assembly. 2018: 14077.
- [41] Lin S Y. Urban hazards caused by ground deformation and building subsidence over fossil lake beds: a study from Taipei City[J]. Geomatics Natural Hazards & Risk, 2022, 13(1): 2890-2910.
- [42] 殷滋. 台北路面现巨坑住户紧急撤离 [EB/OL]. [2023-05-14]. <https://www.163.com/dy/article/I4MLJAFG0514EGPO.html>.
- [43] 赵浩雲. 大直民宅二度塌陷 [EB/OL]. [2023-09-08]. <https://news.ebc.net.tw/news/society/381357>.
- [44] 于川. 信义线东延段建筑下陷 [EB/OL]. [2023-10-13]. <https://www.chinatimes.com/cn/realtimenews/20231013003499-260407?chdtv>.
- [45] 任羿馨. 松山家商疑因捷运施工 1 年下陷 5 公分 [EB/OL]. [2023-12-10]. <https://nextapple.sg/politics/20231210/7EFD0A74CCA6DB5C9287F7FDE0DE3BD2>

周 云（1979—），男，博士，教授。主要从事结构健康监测研究。

陈建炜（1999—），男，硕士研究生。主要从事结构健康监测研究。

郝官旺（1994—），男，博士研究生。主要从事结构健康监测研究。

朱诗琪（1997—），女，博士研究生。主要从事结构健康监测研究。

易伟建（1954—），男，博士，教授。主要从事混凝土结构设计及基本理论研究。

