



《土木工程学报》网络首发论文

题目： 基于星载 InSAR 技术的城市建筑群变形监测与安全风险评估研究综述
作者： 周云, 陈建炜, 邹少豪, 郝官旺, 周晓枫, 朱诗琪
DOI: 10.15951/j.tmgcxb.24080654
收稿日期: 2024-08-14
网络首发日期: 2024-11-22
引用格式: 周云, 陈建炜, 邹少豪, 郝官旺, 周晓枫, 朱诗琪. 基于星载 InSAR 技术的城市建筑群变形监测与安全风险评估研究综述[J/OL]. 土木工程学报. <https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb.24080654>



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.24080654

基于星载 InSAR 技术的城市群变形监测与安全风险评估研究综述

周云^{1,2}, 陈建炜², 邹少豪², 郝官旺², 周晓枫², 朱诗琪²

(1. 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; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要: 建筑作为城市的重要组成部分, 提升大范围建筑群变形监测与风险管控水平, 有助于未来构建“城市体检”机制, 助推城市公共安全治理水平的提升。星载合成孔径雷达干涉测量 (InSAR) 技术因具有监测范围广、精度高、成本低、受天气影响小等优势, 逐渐被应用于建筑安全监测领域。本文立足技术特点、变形识别和风险评估, 综述了近 20 年来该技术在建筑结构监测领域的研究与应用现状。综述成果主要有: 系统性归纳了常用于建筑结构监测的 InSAR 技术及卫星系统, 并总结了相关技术的变形观测精度; 以变形诱因分类, 综述了该技术在建筑结构变形观测方面的研究现状; 从时空维度出发, 综述了基于该技术的建筑结构风险评估方法; 指出了该技术在测点获取、监测频率、三维变形分解等方面的局限性, 并论述了未来多源数据融合监测的发展趋势。最后, 本文分别利用高分辨率和中分辨率卫星影像, 给出了建筑变形监测与风险评估的实例。综合目前已有的研究表明, 基于星载 InSAR 技术开展建筑结构变形监测与风险评估具有较大潜力, 与结构工程理论及多源监测数据深度融合有望进一步提高技术可靠性。

关键词: 结构健康监测; 研究综述; InSAR 技术; 建筑变形; 风险评估

中图分类号: TU196 **文献标志码:** A

A Review of Urban Building Complex Deformation Monitoring and Safety Risk Assessment Based on Spaceborne InSAR Technology

ZHOU Yun^{1,2}, CHEN Jianwei², ZOU Shaohao², HAO Guanwang², ZHOU Xiaofeng², ZHU Shiqi²

(1. Hunan Provincial Key Laboratory for Damage Diagnosis of Engineering Structure, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: As a crucial component of cities, enhancing the deformation monitoring and risk management of large-scale building clusters contributes to the future development of an "urban health examination" mechanism, thereby advancing the governance of urban public safety. Spaceborne Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) technology, with its advantages of wide monitoring range, high precision, low cost, and minimal weather interference, is gradually being applied in the field of building safety monitoring. This paper reviews the research and application status of this technology in the monitoring of building structures over the past two decades, focusing on technical characteristics, deformation identification, and risk assessment. The main contributions of this review are as follows: it systematically summarizes the commonly used InSAR technologies and satellite systems for building structure monitoring and evaluates the deformation observation accuracy of these technologies; it categorizes the causes of deformation and reviews the current research on deformation observation of building structures using this technology; from a spatiotemporal perspective, it summarizes the structural risk assessment methods based on this technology; it highlights the limitations of this technology in terms of point acquisition, monitoring frequency, and three-dimensional

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, 博士, 教授。

通讯作者: 陈建炜, 硕士研究生。 收稿日期: 2024-08-14

deformation decomposition, and discusses the future development trends of multi-source data fusion monitoring. Finally, examples of building deformation monitoring and risk assessment are provided using high-resolution and medium-resolution satellite imagery, respectively. The comprehensive review of current research indicates that building structure deformation monitoring and risk assessment based on spaceborne InSAR technology hold significant potential, and the deep integration of structural engineering theory and multi-source monitoring data is expected to further improve the reliability of this technology.

Keywords: structural health monitoring; review study; InSAR; building deformation; risk assessment

E-mail: cju@hnu.edu.cn

引 言

建筑作为城市的重要组成部分,是人们生活、工作及社会活动的重要载体。随着城镇化进程的发展,我国建筑数量不断扩大,相关数据现实存量住房已超 6 亿栋^[1]。更加值得关注的是,我国于 2000 年前建成的老旧小区数量达 22 万个,涉及 3900 万户居民^[2]。密集的建筑群和大量的老旧建筑同时带来了更大的建筑安全隐患。近年来,我国发生了一系列严重的建筑安全事故。包括 2021 年泉州市发生欣佳酒店坍塌事故^[3]、2022 年长沙某自建房倒塌事故^[4]、2023 年天津某小区突发大面积地面沉降和高层房屋倾斜^[5]、2023 年齐齐哈尔市第三十四中学校体育馆突发坍塌^[6]等。

建筑安全是城市公共安全的重要组成部分,对其开展常态化安全监测具有重要意义。2018 年国务院印发的《关于推进城市安全发展的意见》指出,要健全公共安全体系,加快推进安全风险管控、隐患排查治理体系和机制建设^[7]。党的二十大报告和 2024 年政府工作报告在论及公共安全时进一步指出,要提高公共安全治理水平,推动公共安全治理模式向事前预防转型^{[8][9]}。为加强城市公共安全建设,岳清瑞院士提出了“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^[10]。此外,国务院安委会办公室印发的《城市安全风险综合监测预警平台建设指南(2023 版)》^[11],以及住房和城乡建设部发布的《关于全面开展城市体检工作的指导意见》^[12]更是进一步对我国建筑结构监测预警体系及“城市体检”机制的构建提出了具体要求。

传统结构健康监测发展至今已三十余年的历史,在新型传感器、数字信号分析、结构识别分析、大数据利用等多方面取得了长足的进步,对于单栋建筑结构的健康监测方案已较为成熟。然而,面对大规模城市建筑群的渐变损伤高效识别方法还有待研究。另外,已有结构健康监测方法时常存在基线(Baseline)数据缺失问题,不利于建筑结构性能退化分析。变形

监测作为建筑结构健康监测的重要方面,提出适用于大范围建筑群的变形监测方法,有利于完善已有建筑结构健康监测体系,助力完善大范围城市建筑群的风险筛查方法。然而,基于人工测量、安装原位传感器、GNSS 监测等传统建筑结构变形监测方法存在设备成本高、覆盖范围小、监测效率低、人力投入大、监测不可持续等局限性,无法满足未来建筑群风险监测预警体系和“城市体检”机制构建的需要。

星载合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)是一种新兴的大规模城市级建筑结构变形监测方式。其通过卫星搭载合成孔径雷达(SAR)以固定的轨道绕地运行,将地面电磁波回波信息记录于影像中,对重复过境某一地区所获取的影像进行干涉处理,再依据干涉相位反演观测目标的变形结果^[13]。相较于传统的变形监测方式,星载 InSAR 技术具有以下优点:(1)范围广,例如 Sentinel 卫星在干涉宽幅模式下影像幅宽可达到 250km;(2)可持续,具有不受昼夜影响、可穿透云层、受天气影响小的优势;(3)非接触,基于观测目标电磁波后向散射特性识别测点,无需在建筑上安装原位监测设备;(4)精度高,多时相 InSAR 技术(MT-InSAR)在理论上可达到亚毫米级的变形测量精度,并可基于历史影像追溯建筑变形,从而解决传统监测方式基线数据缺失问题。当前,星载 InSAR 技术已广泛应用于矿区地表沉降^[14]、地震变形^[15]、山体滑坡^[16]、基础设施变形^{[17][18]}等监测领域。未来,该技术还有望利用变形结果和致密三维测点,拓展应用于城市三维重构、变化检测和综合风险预警等领域。

为促进 InSAR 技术的发展和应用,已有学者归纳了相关技术的研究进展。例如,从技术角度出发,综述了差分干涉测量技术(D-InSAR)、永久散射体干涉测量技术(PSI)、小基线干涉测量技术(SBAS-InSAR)、层析 InSAR 技术(TomoSAR)等的发展情况^{[19]-[25]};从应用的角度出发,综述了 InSAR 技术在大型基础设施监测、山体滑坡监测以及大范围地表变形监测等领域的应用现状^{[26]-[30]}。然而,已有综述多侧重关注 InSAR 技术本身,还未见有学者结合建

筑与结构工程专业知识，聚焦该技术在建筑结构变形监测与风险评估方面的应用及研究开展系统性综述。

在过去 20 多年里，星载 InSAR 技术在建筑结构变形监测上的应用研究取得了较长足的发展，但实际工程应用普及率远不及同时期诞生的 GNSS 监测技术，且在建筑业行政主管部门的技术认可度不高。因此，星载 InSAR 技术还需强化技术可靠性论证，并加强与建筑结构可靠度评估方法的衔接。为此，本文从土木工程师的视角出发，侧重考虑星载 InSAR 技术应用于建筑结构变形监测与风险评估时所面临的实际问题，从技术特性、技术可行性、异常变形识别、风险评估以及未来发展趋势等角度出发，对近 20 年以来的相关应用与研究进行了系统性综述，并提出对未来技术发展的展望。本文旨在充分挖掘星载 InSAR 技术优势，推动其与建筑结构理论的深度融合，为未来提出基于星载 InSAR 技术的城市建筑群风险监测预警体系，并构建“城市体检”机制提供研究参考。

1 卫星系统与 InSAR 相关技术

近 20 多年来 SAR 卫星系统得到了长足的发展。表 1 列出了当前在建筑变形监测中常用的 SAR 卫星系统^[31]。当前，为适应地表多样化感知和高精度变形观测的需求，SAR 卫星系统正朝着多拍摄模式、多极化模式、多波段、高分辨率的方向发展，这为开展更加精细化的建筑结构变形监测奠定了良好基础。伴随 SAR 卫星系统的进步，InSAR 技术也逐步衍生出众多具有不同优势的子技术。针对建筑结构变形监测的特性化需求，常用的有 D-InSAR 技术、PSI 技术、SBAS-InSAR 技术以及 TomoSAR 发展来的差分层析干涉测量 (D-TomoSAR) 技术。鉴于技术相关的综述已较为完备，本文仅以建筑结构变形观测为出发点，对技术的发展与特点进行简要概述。

1.1 D-InSAR 技术

D-InSAR 技术最早在 Gabriel 等^[32]的研究中被提出，之后 Bamler 等^[33]和 Rosen 等^[34]对其进行了更加详尽的研究论述，是最早被用于观测地物变形的一项 InSAR 技术。如图 1 所示，其核心思想在于通过对卫星两次过境记录影像进行干涉处理，并通过参考椭球相位去除、地形相位去除、相位滤波、变形反演等处理流程反演目标在视线向 (LOS) 上的变形^[13]。其干涉相位组成如式 (1) 所示。其中， φ_{ref} 为参考椭球相位，可通过参考椭球面予以去除； φ_{top} 为地形相位，可通过引入数字高程模型 (DEM) 去除； φ_{atm} 为大气相位， φ_{noi} 为噪声相位，可通过相位滤波等方式予以

去除。将上述相位去除后可得对应的变形相位 φ_{def} 。

$$\varphi = \varphi_{ref} + \varphi_{top} + \varphi_{atm} + \varphi_{def} + \varphi_{noi} \quad (1)$$

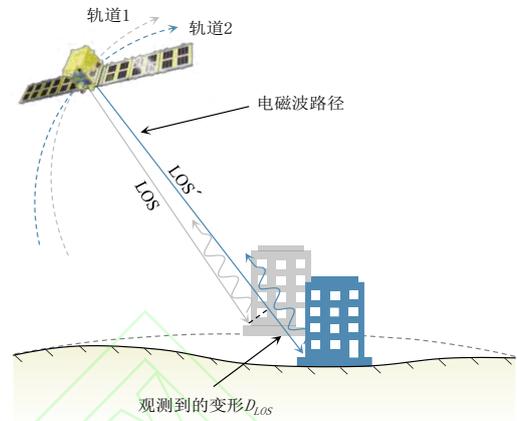


图 1 SAR 卫星观测示意图

Fig.1 SAR satellite observation schematic diagram

1.2 PSI 技术

由于 D-InSAR 技术直接对两幅影像的全像素进行干涉处理，解析速率和精度较低。此外，由于仅依靠两幅 SAR 影像识别目标变形，导致其无法获取目标的变形时间序列，不利于开展单体建筑精细化变形监测。在此基础上，Ferretti 等^{[35][36]}于 2000 年提出了经典的 PSI 技术。其核心思想在于，从 N 幅 SAR 影像中选择 1 幅影像作为主影像，配准形成 N-1 个干涉对，此后通过相位离差阈值^[37]、振幅离差阈值^[38]、相干系数阈值^[39]等方法，识别后向散射特性稳定的永久散射体 (PS)，再基于 PS 点的合理化构网反演变形场。PSI 技术的核心在于对 PS 网络中每一连线两端的差分干涉相位进行准确的估计，从而准确识别点位变形。传统的差分干涉相位模型如式 (2) 所示^{[35][36]}。式中， R 为卫星雷达与观测目标的斜距， λ 为雷达波波长， θ 为电磁波入射角， Δv 和 ΔRTE 分别为相连 PS 点的速率差和程差， ΔT 和 B_{\perp} 分别为干涉影像对中两幅影像的时间基线与空间垂直基线， $\Delta\varphi_{res}$ 为相位残差。

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta T \Delta v + \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R \sin \theta} \Delta RTE + \Delta\varphi_{res} \quad (2)$$

这一模型虽然可以较为准确反演出 PS 点的线性变形，但在面对高层建筑或大跨建筑的非线性温度变形时，容易出现严重的变形反演偏差。为此，Monserrat 在式 (2) 中添加了温度项，提出了如式 (3) 所示的扩展干涉相位模型^[40]。式中， $\Delta Temp$ 为不同观测时刻对应的温度差， ΔThe 为相连 PS 点的热膨胀参数之差。

表 1 常用于建筑变形监测的 SAR 卫星系统^[26]

Table 1 Satellite SAR systems commonly used for building deformation monitoring

卫星系统	研制	入轨时间	波段	分辨率 (m)	极化方式	幅宽 (km)	单星重返周期(天)
ERS-1/2	欧空局	1991/1995	C	25	VV	100	35
ENVISAT	欧空局	2002	C	20	VV/HH	100~400	35
ALOS-1/2	日本	2006/2014	L	1~100	VV/HH	25~490	46/14
Sentinel-1	欧空局	2014	C	5/20	双极化	20~400	12
COSMO-SkyMed (CSK)	意大利	2007	X	1/3/15	全极化	10~200	1~16
TerraSAR-X (TSX)	德国	2007	X	1/3/16	双极化	5~150	11

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta T \Delta v + \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R \sin \theta} \Delta RTE + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta Temp \Delta The + \Delta\varphi_{res} \quad (3)$$

相较于 D-InSAR 技术,一方面,PSI 技术只选择置信度高的 PS 点进行变形反演,提高了计算效率;另一方面,PSI 技术易在建筑上识别到 PS 点,并获取其变形时间序列,提高了星载 InSAR 技术在建筑结构变形监测方面的适用性。鉴于裸土覆盖区等处不易探测到 PS 点, Ferretti 等^[41]进一步提出了 SqueeSAR 算法,可进一步识别分布式散射体 (DS) 进行变形观测,在一定程度上弥补了 PSI 技术的不足^{[42]-[46]}。在后文中,我们将 PS 点和 DS 点统称为测点。

1.3 SBAS-InSAR 技术

PSI 技术单一主影像的干涉对构建方式,不可避免存在干涉对时空基线过长,或一些对干涉质量较差的问题。为此, Berardino 等^[47]提出了 SBAS-InSAR 技术,通过确定合适的时空基线阈值将影像集划分成若干小基线影像集,再通过奇异值分解 (SVD) 法获取测点的变形时间序列。在此基础上, SBAS-InSAR 技术还能够同时探测 DS 点,使测点密度得到提高^{[48]-[50]}。为进一步提升技术的适用性, Hooper 等^[51]还提出了一种 PSI 技术和 SBAS-InSAR 技术相结合的混合算法,将两种方法筛选出的测点结合,进一步提高了测点密度及观测结果的总体信噪比。

1.4 D-TomoSAR 技术

由于 SAR 影像在密集建筑区易存在较为严重的叠掩现象^[52]。在叠掩情况下,影像同一像素内可能存在多个 LOS 向距离相等但真实高度不同的测点,而 PSI 技术和 SBAS-InSAR 技术无法分离这些测点。对此, TomoSAR 技术可利用多幅具有轻微视角差异的 SAR 影像,建立观测向量与高程向散射系数剖面的变换关系,从而分离出同一像素内的多个测点^{[53][54]}。因此, TomoSAR 技术也被成为 3D-SAR 技术。然而,传统的 TomoSAR 技术无法反演测点的变形时间序列。在此基础上, Lombardini 等^[55]提出了 D-TomoSAR

技术,由于其在进一步具备了反演测点变形速率的能力,因此也被称为 4D-SAR 技术。传统 D-TomoSAR 技术的单一像素后向散射信号可以利用式 (4) 表示,在变形反演方面并未考虑非线性变形的情况^[56]。式中, γ 为层析向散射系数, s 为层析向坐标, v 为线性变形速率, ξ_n 、 η_n 分别为与空间基线和时间基线相关的系数。

$$g_n = \iint_{\Delta s \Delta v} \gamma(s, v) e^{-j2\pi(\xi_n s + \eta_n v)} d_s d_v \quad (4)$$

为更加准确估计非线性温度变形, Reale 等^[57]提出了考虑温度非线性变形的 5D-SAR 技术,此时单一像素的后向散射信号被拓展为式 (5)。式中, k 为热膨胀参数。

$$g_n = \iiint_{\Delta s \Delta v \Delta k} \gamma(s, v, k) e^{-j2\pi(\xi_n s + \eta_n v + \zeta_n k)} d_s d_v d_k \quad (5)$$

1.5 不同 InSAR 技术对比

综合以上论述,表 2 进一步统计了不同 InSAR 技术的发展情况,包括不同技术的突破、优势及适用性。相较于早期的 D-InSAR 技术, PSI 主要突破在于可在影像全域筛选高置信度测点,克服噪声、大气延迟等无关相位的干扰,进而反演出观测目标可靠的变形时间序列。PSI 技术的出现,极大推动了近二十余年星载 InSAR 技术在建筑监测上的研究与应用。此后, SBAS-InSAR、D-TomoSAR 等技术针对 PSI 技术的不足进行改进,提升了星载 InSAR 技术在建筑监测上的应用潜力。值得说明的是, D-InSAR 技术虽然无法获取建筑的时间变形序列,但利用变形前后两景影像解析空间变形场,对于建筑风险的初步评估同样具有较大潜力。因此,对于不同时期发展起来的 InSAR 技术,虽然在变形获取、测点密度、适用场景等方面存在差异,但并没有绝对的优劣之分。由于不同地区建筑的情况差异较大,因此综合运用多种 InSAR 技术开展建筑变形监测与风险评估更具工程可行。

2 建筑变形监测的关键问题

表 2 InSAR 技术特性统计

Table 2 Characterization statistics of InSAR technologies

技术	提出时间	主要突破	主要优势	适用性
D-InSAR	1989	基于 SAR 影像提取地表变形	影像需求数量少	地震、滑坡等短时大变形场解析
PSI	2001	克服噪声、大气延迟等相位干扰	可获取变形序列	大范围城市建筑群变形解析
SBAS-InSAR	2002	克服 PSI 技术干涉对时间基线过长问题	干涉对相干性高	边坡、裸土区等处低层建筑变形解析
D-TomoSAR	2005	克服建筑叠掩现象	建筑测点密度高	单体建筑精细化变形解析

与现有工程规范的对接是基于星载 InSAR 技术开展建筑结构变形监测的重点和难点。由于《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB5092-2014^[58]、《工程测量标准》GB50026-2020^[59]以及《危险房屋鉴定标准》JGJ 125-2016^[60]等测量相关规范对测点位置和变形阈值均做出了具体要求，因此为满足规范要求，必须高度关注星载 InSAR 技术在空间维度上所能获取的测点密度和定位精度，以及在时间维度上所获取变形结果的观测精度。

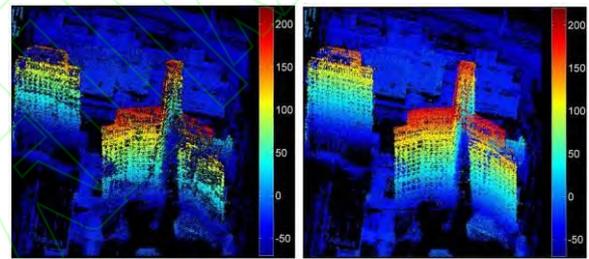
关于测点定位精度的问题，杨梦诗等^[61]已经开展了较为完备的综述。结果表明，星载 InSAR 技术所获取测点的三维定位精度主要受传感器、大气、地球动力、坐标转换及参考点等因素的影响，通过观测方法改进可以将定位精度提高到米级以上。因此，本文主要围绕测点密度和技术变形观测精度进行归纳。

2.1 空间维度上建筑测点密度问题

一方面，SAR 卫星影像分辨率是建筑上所能获取测点密度的关键因素。Ma 等^[29]对香港国际机场航站楼的观测结果表明，在更高精度的 CSK 和 TSX 影像中识别到的测点数量分别超过了 Sentinel-1 影像的 5 倍和 30 倍。Adam 等^[62]研究表明 TSK 影像识别到的测点数量可以达到 ERS 影像的 67 倍以上。Crosetto 等^[63]和 Perissin 等^[64]的研究表明，在城市区域 X 波段的影像集可以探测到的测点密度是 C 波段影像集的 20 倍以上。另一方面，InSAR 技术的改进有助于提高在建筑上的测点密度。相关研究表明，联合探测 DS 点和 PS 点可以将测点密度提高 5 倍以上^{[41][50]}。如图 2 所示，利用 TomoSAR 算法对单双散射体进行分离，其测点密度甚至足以体现建筑的立面特征^{[65]-[68]}。此外，还可通过构建双层测点网络提高测点密度。其基本思想在于，先利用置信度高的测点构建第一层网络，此后再构建基于第一层测点的局部星状网络，从而达到提高测点密度的效果^{[65][69]}。

在此基础上，利用多轨道卫星影像获取测点进行融合是进一步提高建筑测点密度的有效方法。然而，并非所有地区都同时被多轨道影像所覆盖，且对两影

像集获取的测点进行准确的三维配准具有较大的难度。针对精确配准问题，一方面可以通过寻找同名点，再基于整体残差最小原则进行平移配准^[70]；另一方面可以通过三维点云的几何特征进行匹配。如图 3 所示，Wang 等^[71]提出的基于单体建筑点云分割和 I 形特征检测的匹配流程，可高效实现升降轨测点的配准。



(a) 单散射体结果 (b) 单双散射体融合结果

图 2 基于 TomoSAR 技术获取的建筑测点^[68]

Fig.2 Building Measurement Points Obtained Based on TomoSAR Technology

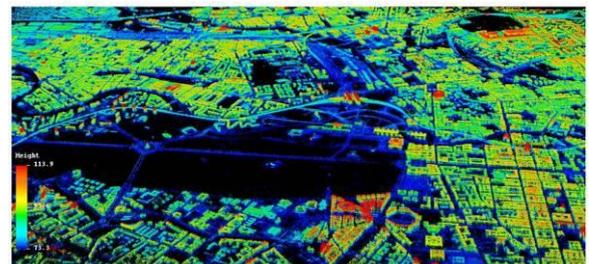


图 3 基于特征点的建筑测点匹配结果^[66]

Fig.3 Feature point-based matching results of building measurement points

综合来看，影像分辨率的提高和 InSAR 技术的改进使得测点密度已经足够用于建筑结构的精细化变形监测，但在不同影像、不同区域、不同建筑上识别到的测点密度依旧存在一定的离散性。这暴露了星载 InSAR 技术在建筑测点探测时的不确定性。其主要原因在于，一方面，不同建筑的物理特性会对测点密度造成很大影响。建筑群密集区可能使 SAR 影像存在较为严重的叠掩、阴影现象，进而导致测点密度的下降；在其它条件相同情况下，具有更强后向散射特性的屋

顶材质（如金属棚顶等）则会显著提高建筑上的测点密度^[72]。另一方面，建筑周边环境会对测点的识别产生较大干扰。例如，过多的植被覆盖可能使得影像相干性很低，从而导致测点的缺失^[63]。此外，SAR 卫星极化模式、观测角度、建筑外形等因素同样会对测点密度产生较大的影响^[73]。在点云配准方面，基于同名点或几何特征的配准方法均可有效提高建筑上的测点密度，但由于在升、降轨观测模式下，测点往往位于建筑的不同立面上，会导致第一种方法需要的同名测点难以获取。因此，在这种情况下基于特征点的点云匹配流程具有更高的实用性。

2.2 时间维度上变形观测精度问题

由式（1）、式（3）可见，星载 InSAR 技术的观测精度受到多方面因素影响。尽管 Ferretti 等在理想条件下验证了 PSI 技术具有亚毫米级的观测精度^[74]，但实际变形观测精度易因影像相干性、外部 DEM 数据、大气延迟相位、历史温度数据等因素的干扰而产生偏差。因此，已有研究对星载 InSAR 技术在实际建筑结构变形观测中的精度开展了系列校验。

表 3 列出了星载 InSAR 技术在城市建筑群或单体建筑结构变形观测时的精度验证结果。可见，虽然星载 InSAR 技术具备理论上的亚毫米级精度，但在建筑监测的实际应用中，易与其它监测方式存在 1~10mm 的偏差。但这种偏差在更多情况下是由于对比测点之间空间位置不一致造成的，而非真实的测量误差。例如，文献[79]、[80]将多个 PS 点变形结果向水准测点进行空间插值后再进行对比，得到的测量偏差更小；从文献[82]-[84]的对比结果也可见，随对比测点之间的间距变大，测量偏差也随着增大。除此之外，变形参考点选取、测量频率差异、人为误差等因素亦可能导致这种偏差。需要说明的是，由于各类 InSAR 技术求解变形时间序列的基本思想与 PSI 技术类似，因此在变形精度上不存在过大的偏差。综合来看，利用星载 InSAR 技术开展建筑结构变形监测已具备优于 5mm 的精度。但考虑 InSAR 技术流程涉及的参数选择具有较强的主观性和经验性，因此对变形结果的校验依旧是不可缺少的环节。在缺乏校验数据情况下，可通过结合建筑结构理论对结构变形进行初步分析，进而在一定程度上保证 InSAR 技术反演变形结果的可靠性。

3 以异常变形识别为目标的建筑变形监测

建筑结构异常变形识别是星载 InSAR 技术观测建筑结构变形的首要目标。得利于 SAR 卫星开阔观测

视野和定期重返观测的优势，使其在大范围建筑群变形观测，以及结合建筑、环境等信息开展深入建筑结构变形解析方面具有显著优势。然而，实际建筑结构变形的诱发原因往往十分复杂，包括自身特性、自然灾害、人为干扰等多方因素。受限于星载 InSAR 技术仅能直接获取卫星与测点间单一维度的 LOS 向变形的劣势，如何利用这一有限变形信息识别建筑的异常变形，并进行原因分析成为了问题的关键。为此，本文按变形诱因分类，系统归纳了基于星载 InSAR 技术的建筑结构变形观测现状，对技术优缺点以及建筑变形特征、产生原因、异常变形识别等进行了全面总结。

3.1 自身特性诱发变形

本文中所述自身特性诱发变形是指建筑结构因自重、材料、结构等因素引起的变形。对于新建筑，尤其是超高层或大跨度建筑，这种因自身特性诱发的变形可能十分明显，但在不过度发展情况下对建筑安全的影像不大。因此，若不对此类变形加以区分，可能对异常变形识别产生严重干扰。

3.1.1 自重特性诱发的建筑变形

建筑自重对地基产生附加应力，导致土层固结压实，可能诱发建筑发生不同程度的沉降^{[82][86][87]}。在大范围建筑变形观测时，通过考察建筑密度与变形是否具有正相关性，可以高效识别此类变形^{[88]-[90]}。但需要注意的是，建筑密度只能在建筑高度相同情况下大致表征地基承受建筑自重恒荷载的大小，对于不同建筑高度、不同结构形式，以及不同建筑活荷载导致的地基土压力差异还需额外考虑。

对于此类建筑变形，一方面与地基土质具有强相关性。Ardizzone 等^[91]的研究确认了地基浅层粘土、粉质和砂质层的存在，是造成建筑沉降的根本原因。对于地质可靠且基础牢固的建筑，这种自重诱发的整体沉降会随时间推移而收敛^[92]，因此正常情况下这一变形分量需要在建筑异常变形中予以剔除。但对于建立在深厚沉积层上的建筑，这种沉降可能持续发生^[93]。过大的建筑沉降可能损害水电等建筑附属设施，并对建筑的正常使用功能造成破坏。此外，更加需要注意的是，对于跨越不同压缩性质的土层的建筑，还可能产生严重的不均匀沉降^{[81][94]}，从而导致建筑开裂等影响承载能力安全的结构损伤。

另一方面，建筑基础形式对此类建筑变形具有较大影响。设置有桩基础的高层建筑比浅基础的低层建筑更加稳定^[95]。如图 4 所示，其主要原因在于桩基础可同时获取持力层的端部支撑反力，以及来自周边土体向上的侧向摩阻力，而浅基础建筑则需要通过压缩浅层地基土形成竖向支撑力。由于这一类变形往往是

竖向的，因此仅需简单的几何换算，即可将观测到的 LOS 向变形 Δ_{LOS} 转化为真实的沉降值 Δ_v 。但值得注意

的是，这种沉降往往还受断层分布、土层特性、土地历史用途等多方面因素的综合影响^{[96]-[98]}，使得沉降曲

表 3 InSAR 技术建筑变形测量精度研究

Table 3 Research on the measurement accuracy of building deformation using InSAR technology

对比数据	文献源	InSAR 技术	SAR 影像	对比方式	InSAR 技术测量精度
水准测量	Juan 等[75]	PSI	TSX	区域平均	变形测量误差约 2mm
	Garcia 等[76]	PSI	ENVISAT	临近测点	竖向变形均方根误差<5mm
	Perissin 等[77]	PSI	ERS	临近测点	变形标准差小于 2mm/a
	Zeni 等[78]	SBAS	ERS、ENVISAT	临近测点	变形测量标准差约 5mm，变形速率偏差小于 1mm/a
	Karila 等[79]	PSI	ERS、ENVISAT	测点插值	竖向变形偏差<1mm
	Yang 等[80]	PSI	TSX	测点插值	均方根误差约 1mm
GNSS	Barla 等[44]	SqueeSAR	CSK、TSX	临近测点	多年的竖直和水平变形分量演化趋势高度一致
	Osmanoglu 等[81]	PSI	ENVISAT	临近测点	变形速率均方根误差 6.9mm/a
	Poreh 等[82]	PSI	ENVISAT	测点间距<1000m	变形速率标准差<10mm/a
	Fabris 等[83]	PSI	CSK、S1	测点间距<200m	变形速率差异<5mm/yr，最大差异 10mm/a
GBSAR	Ng 等[84]	改进的 PSI	Sentinel	测点间距<90m	竖向变形速率偏差 0.75mm/a
	Crosetto[85]	PSI	CSK、TSX	临近测点	高层建筑温度变形标准差为 0.04 mm/°C

线往往存在一定的非线性特征^[99]。因此，深入考虑土层物理参数以及土层与建筑间的复杂相互作用，探索土层数值模拟与星载 InSAR 观测技术的融合^{[100][101]}是进一步开展研究的重要方向。

可对建筑建成后开展定期沉降观测，进而研判基础、抗浮措施等隐蔽性工程施工质量与设计要求的偏差。

3.1.2 材料特性诱发的建筑变形

除建筑自重引起的整体变形外，高层和大跨建筑的上部结构在外部温度变化的作用下会发生升温膨胀或降温收缩变形^{[68][102][104]}。此类建筑结构变形观测的主要难点在于温度变形具有非线性波动特征，传统 InSAR 技术易在反演此类变形时出现显著偏差。为此，Crosetto 等^{[85][105]}和 Reale 等^[57]提出基于温度拓展变形反演模型显著提高了建筑周期性温度变形的观测精度，为建筑长周期变形的精细化观测奠定了基础。

首先是建筑结构温度变形的精细化观测。Wu 等^[106]利用星载 InSAR 技术对一片超高层建筑群进行了为期两年的观测，发现建筑顶端的变形与温度存在高度的正相关性^[69]。此外，一些研究利用该技术获取高层建筑的热膨胀系数，发现数值普遍介于 $5\sim 14 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ^{[107][108]}，与建筑材料的热膨胀系数处于相同量级。作者此前对长沙地区 9 栋高层建筑的变形观测结果也取得了类似的结果^[109]。在对建筑温度变形并进行剔除后，星载 InSAR 技术可用于建筑收缩徐变的识别。Zhou 等^[110]在剔除新旧两栋超高层建筑的温度变形分量后发现，新建高层存在更为明显的收缩徐变现象，Ma 等^[107]在剔除一栋高层建筑的温度变形后发现不均匀收缩徐变可能会导致超高层建筑的细微倾斜，Gernhardt 等^[111]将星载 InSAR 技术获取的建筑收缩徐变曲线与混凝土材料的典型脱水收缩曲线进行对比，发现二者具有很高的趋势一致性。

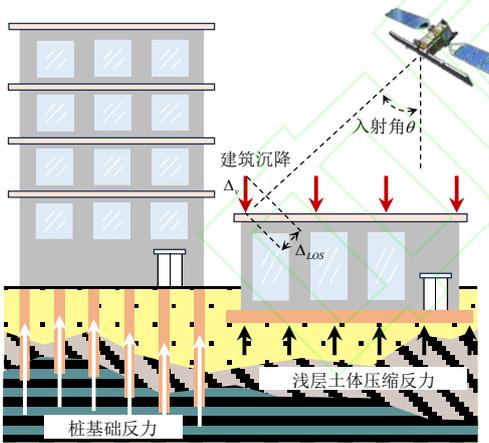


图 4 自重诱发的建筑沉降

Fig.4 Settlement of buildings induced by self-weight

综上所述，自重诱发的建筑沉降受到建筑群密度、单体建筑重量、建筑基础形式、地基土层特性等多方面因素的共同影响，这意味着在实际建筑群风险筛查的过程中，尤其是面对缺乏设计及地质勘探信息的老旧建筑监测时，可能在变形解析上存在困难。但具有积极意义的是，星载 InSAR 技术对此类建筑变形的高效观测，具有被应用于施工质量检测的潜力。例如，经过规范设计的建筑都对基础形式、桩基深度以及整体稳定性有着严格的控制要求。利用星载 InSAR 技术

如图 5 所示, 对于外形简单的单体建筑而言, 其温度变形或收缩徐变往往沿结构纵向累积, 可通过 LOS 向变形的简单几何换算得到。因此, 相较于传统安装传感器、GNSS 测站等单点监测方式, 星载 InSAR 技术更具备统计建筑结构材料特性变形的优势, 可为未来结构设计提供宝贵参考依据。例如, 可借鉴已有建筑的变形特征, 通过对结构设计的优化, 避免建筑因温度变形或收缩徐变对门窗、幕墙等的正常使用造成影响。然而, 需要注意的是, 对于外形复杂的大型公共筑、超高层连体结构等复杂结构, 温度变形可能同时存在竖向和水平向分量, 使得单维度的 LOS 向变形结果无法充分反映这些建筑的变形模式。

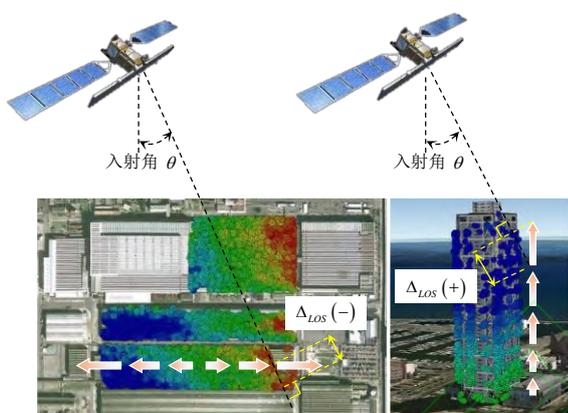


图 5 建筑温度变形观测^[86]

Fig.5 Observation of temperature deformation in buildings

3.2 人为干扰因素诱发变形

本文将人为干扰因素诱发的变形定义为, 因人为改变地质水文条件、建筑结构形式等情况所诱发的建筑结构变形。常见情况有城市地下空间开发、建筑周边基坑开挖、地下水抽取、结构体系改变等。

3.2.1 地下水开采因素

随城市规模的扩张, 人们对地下水的过度利用可能导致地下水位下降, 进而诱发大范围的建筑沉降。一般情况下, 这种沉降会随着城市的扩张而发展^[112], 可通过考察沉降趋势是否与地下水位具有相关性进行识别。Hussain 等^[113]和 Gumilar 等^[114]的进一步研究结果表明, 地下水过度开采还可能导致建筑的严重开裂。由于地下水开采导致的建筑变形往往以大范围沉降漏斗的形式存在, 传统建筑结构变形监测方法受限于单点监测的劣势, 难以准确识别并分析此类变形。星载 InSAR 技术的优势在于, 可高效识别并标记因地下水位下降导致的异常沉降区, 并绘制沉降边界和沉降剖面, 有助于实现风险预警和城市治理决策的制定。

此类变形监测的难点主要在于地下水位数据的获取, 但我国各地区地下水位测站分布还较为稀疏, 水位数据获取的门槛也较高。同时, 地下水空间分布的

不均匀, 以及不同建筑受地下水位变化导致变形的敏感性不同, 进一步加大了此类建筑变形的解析难度。

3.2.2 地下隧道开挖因素

利用星载 InSAR 技术可以对地上建筑在隧道施工前后的变形进行观测对比, 进而识别因隧道开挖导致的异常建筑变形。在隧道开挖过程中, Barla 等^[44]联合利用 SAR 卫星升轨和降轨影像获取的两个 LOS 向变形结果, 准确反演了城市地铁隧道开挖时在上部建筑区形成的竖向和横向变形场。但更复杂的是, 部分研究发现在隧道开挖时, 建筑和地基间存在着复杂的相互作用。Giardina 等^[115]基于星载 InSAR 技术拟合隧道沿线沉降剖面后发现, 建筑的存在会显著改变沉降剖面的形态, 即建筑和地基间存在复杂的协调变形。进一步地, Yang 等^[116]发现, 在地下隧道开挖时, 建筑和地表间存在多种相对变形模式, 这提高了异常变形分析的复杂性。此外, 在隧道竣工后投入运行的初期, Perissin 等^[117]发现, 由于地铁动荷载对土层的扰动, 也会导致上部建筑产生一定的沉降变形。

传统利用水准测量等方式开展隧道沿线建筑变形监测时, 受到监测效率和监测成本的制约, 往往需要人为界定有限的监测范围, 可能导致异常变形建筑的遗漏。星载 InSAR 技术则可以高效覆盖隧道沿线所有建筑, 在提高监测效率的同时极大节约监测成本。但从上述相关研究成果可见, 受隧道规模、施工方式、地质情况等多方面因素的影响, 因隧道开挖导致的上部建筑变形情况往往较为复杂, 异常变形难以用单一平均变形速率或 LOS 向累积变形进行识别。因此, 如何深入挖掘星载 InSAR 技术获取的变形结果, 针对不同工程的实际情况, 提出合理化的异常变形指标及阈值确定方法, 是进一步提高星载 InSAR 技术在此类变形监测中实用性的关键。

3.2.3 地下矿区开采因素

地下矿藏开采可能极大破坏原有建筑地基的稳定性, 从而诱发较大的建筑沉降, 进而导致 SAR 影像在时序分析时的失相干。在此情况下, 如何保证建筑上的测点密度, 以及沉降场识别的准确性成为了不可忽视的技术重点。在提高建筑测点密度方面, 可采用 SBAS-InSAR 技术构建相关性较高的干涉影像对组合, 在一定程度上克服失相干效应, 从而识别到足够用于建筑异常变形分析的测点^[118]。在大变形场识别方面, 可利用 D-InSAR 技术分析矿区沉降, 并基于 Boltzmann 函数模型解决概率积分方法边界收敛速度较高的问题, 进而准确获取矿区上建筑区大变形场^[119]。此外, 更值得关注的是, 矿区上部建筑除沉降外还可能存在着其它方向的变形分量。一方面, 地基过大

的沉降漏斗可能引起建筑水平向变形分量^[119]；另一方面，石油高压注水开采区的上部建筑还可能因为地下孔隙水压力的增大而存在竖向隆起变形^[120]。

由于矿区开采面积往往较大，传统水准测量、全站仪测量、GNSS 监测等方法由于测点密度有限，无法有效识别变形区域边界。相较之下，星载 InSAR 技术只需将参考点选择在矿区平面外，即可高效获取建筑区变形场及其演化过程。另一方面，由于矿藏开采周期较长，因此 SAR 卫星定期重返的特性十分有利于开展建筑的持续性观测，可极大减少监测过程的人工投入。需要注意的是，由于矿区上建筑可能同时存在竖向和水平向变形，因此利用单一视角的 SAR 卫星观测可能存在较大偏差。

3.2.4 其它人为施工因素

除上述人为干扰因素外，人为改变建筑结构内部体系，或在建筑周边开展大型工程活动也可能导致建筑异常变形的发生。相较于上述各种人为干扰因素诱发的建筑整体失稳变形，由于建筑自身结构体系具有一定的安全冗余性，因此局部结构形式改变导致的变形往往更加细微。然而，由于结构原本的力学体系受到破坏，改变结构体系导致的建筑风险可能远高于其它各类人为干扰因素。对于这类变形，其主要的监测难点在于细微的变形量和较小的变形范围。虽然已有研究表明星载 InSAR 技术具备识别这种轻微建筑变形的能力^{[121]-[123]}，但其极易被其它结构自身特性或其它人为因素诱发的变形所掩盖。同时，由于 SAR 卫星单侧观测成像的特性，以及密集分布建筑间相互遮挡造成的阴影效应，易造成局部异常变形信息的丢失。此外，临近的大型工程活动可能使建筑地基遭受不利影响，导致突发大变形的发生^[5]。受限于 SAR 卫星多天的重返周期，对于这种情况星载 InSAR 观测技术监测预警的能力还较为有限。

3.3 自然因素诱发变形

本文所述自然因素诱发的建筑变形主要指，在没有人为了干扰情况下，自然环境条件改变造成的建筑变形。一般影响因素包括地震、降雨以及土体滑移等。

3.3.1 地震因素

地震是引发建筑严重变形的自然因素之一，利用星载 InSAR 技术开展建筑震后风险评估具有显著优势。一方面，通过地震前后的两幅 SAR 影像进行同震变形场干涉测量分析，可以有效识别建筑区地震前后的相对变形，进而开展区域风险评估^{[124][125]}。另一方面，利用星载 InSAR 技术可对未倒塌建筑持续使用的变形稳定性进行定期监测^[126]。Sciortino 等^[127]的研究表明，由于地震对建筑结构体系及地基土层的影响，

建筑震后建筑结构变形的不稳定程度与震损程度存在较为明显的正相关性。针对地震多发区域，未来可结合星载 InSAR 技术在此领域的观测优势，对震区建筑开展定期变形观测，基于与地震前建筑长期变形基线数据的比较，高效识别因地震产生的潜在建筑结构损伤。考虑到星载 InSAR 技术观测到的震区变形往往是陆地板块错动造成的地面变形，而建筑自身往往遭受破坏性的倒塌，这偏离了本综述研究的主线。因此，对于地震相关的建筑变形观测本文不再作过多赘述。

3.3.2 降雨因素

降雨通过对地下水的补充，可使地下水位出现上下波动的趋势，进而引发地基上建筑群的失稳^{[84][128]}。在湿陷性黄土区，因为土层在雨水渗入后发生膨胀，导致建筑易在降雨情况下遭受隆起变形^[129]。由于建筑基础和周边排水系统的差异，强降雨下不同建筑可能出现隆起变形的程度不尽相同^[130]。此外，由于降雨对土壤的湿度条件的改变，还可能加剧已有异常变形建筑的不稳定性^[131]，尤其对位于土体不稳定区的建筑，这种现象更加明显^{[43][132]}。在强降雨情况下，地面监测设施及标识可能遭受破坏，开展地面监测和人工测量难度较大。因此，星载 InSAR 技术的主要优势在于其受天气影响较小，可通过在建筑上部识别到的测点分析建筑变形。从本质上看，降雨导致的建筑变形的核心原因主要是土层含水量的增加。由于地表水渗入地下需要一定的时间，因而降雨诱发的变形可能存在一定的滞后效应。正常情况下，此类建筑结构变形是暂时性的，会随降雨的结束和土层含水量减少而恢复。因此，在开展此类建筑变形观测时，应将观测重点置于建筑异常变形发生后的长期观测，从而研判降雨是否导致建筑产生永久性变形分量和持续性变形趋势。

3.3.3 土体滑移因素

土体滑移导致的建筑结构变形多发生于地质复杂的山体边坡区域，导致建筑变形模式往往更为复杂，除存在竖向变形分量外，时常还存在显著的东西向或南北向的水平变形分量。在技术可行性上，Pratesi 等^[112]的研究结果证明了星载 InSAR 技术可以高效识别因土体滑移导致的建筑变形。然而，星载 InSAR 技术无法直接区分竖直向和水平向变形，为土体滑移诱发的建筑变形观测带来了困难^[133]。为此，在土体滑移方向明确的区域，可将获取的建筑 LOS 向变形直接向滑坡方向投影转换，进而获取建筑整体变形速率^[134]；对于更加复杂的情况，可融合利用升轨和降轨观测，分解得到建筑的垂直向或东西向变形分量^[135]。由于滑移土体的体量往往十分庞大，可能导致建筑发生持续性的整体性位移。尤其对于浅基础建筑，此类变形的发

生概率更高^[136]。值得关注的是,因为建筑各点位未发生相对变形,在传统局部建筑结构变形监测方式下这种变形容易被忽视。相较之下,星载 InSAR 技术可以通过远距离的参考点选取,更为有效地识别特定区域内建筑的整体变形^{[137][138]}。

土体滑坡发生区域具有较强的不确定性,利用星载 InSAR 技术排查因土体滑坡导致的建筑异常变形具备效率高、成本低、人力投入小等优势。但由于土体滑坡较于其它自然因素导致的建筑结构变形易产生更大的累积变形,同时具有更多方向的变形分量,因此星载 InSAR 技术在此类变形监测上面临更大的困难。虽然可以通过多卫星联合观测的方式在一定程度上予以改进,但由于 SAR 卫星轨道与南北向夹角很小,对南北方向的变形不敏感,导致建筑的真三维变形分解方法还有待进一步完善。此外,在土体滑坡区往往具有较高的植被覆盖率,因此如何克服 SAR 影像较大的失相干性,进而确保测点密度和变形观测精度同样是此类变形观测的重点。

3.4 多因素耦合诱发变形

表 4 总结了单因素影响下的建筑结构变形趋势及特征,但实际的结构变形往往是多变形耦合的结果。由于温度变形是建筑材料的固有特性,因此温度变形与收缩徐变^[107]、地基固结沉降^[111]、施工诱发变形^{[140][141]}、地下水诱发变形^[142]等的耦合是最为常见的。在沿海区域,温度变形还可能与风荷载造成的变形耦合^[106]。受建筑地基土特性的影响,地基固结沉降还容易与地下水位诱发变形^{[46][94]}、降雨诱发变形^[129]发生耦合。在土体滑坡区,建筑结构变形还易受到降雨的共同影响^[136]。此外,如图 6 所示,Sheng 等^[143]对新冠疫情发生前后的北京市沉降进行观测,发现城市沉降可能受到地面荷载等复杂人为活动因素的影响。需要警惕的是,Chen 等^[144]的研究结果表明,相较于单一因素导致的建筑结构变形,多因素耦合下导致的建筑结构变形具有更高的安全风险。

在这种情况下,一方面会对星载 InSAR 技术变形观测精度造成影响。由于 InSAR 技术求解变形是最参数优化估计的过程,因此当建筑同时存在表 4 中的线性或非线性变形趋势分量时,需要使用较长时间跨度的影像集来减小变形反演的偏差^[145]。另一方面,这些耦合变形模式会对建筑异常变形识别造成困难。为此,Zhu 等^[140]Han 等^[130]分别通过多项式拟合和奇异谱分析(SSA)的方法分离变形中的周期项、趋势项和残余项,从而提高建筑异常变形的识别精度。通过对 LOS 变形的分解,在一定程度上提高了建筑结构变形观测结果的可解析性。然而,在变形分解时,为保证趋势

项和周期项的估计精度,需要较长期的观测结果作为基础,这降低了大范围建筑群异常变形的识别效率。同时,在缺乏场地勘察信息情况下,星载 InSAR 技术所需的稳定变形参考点难以选取,易对建筑结构变形识别造成影响。为此,作者此前从 SAR 卫星独特的观测视角出发,系统性总结了高层建筑多变形分量耦合下的三类变形模式,提出图 7 所示的温度相关变形系数求解方法,并提出基于该系数演化趋势的高层建筑异常识别方法^[109]。结果表明,该方法可以有效克服建筑温度变形和参考点不稳定的干扰,有效识别建筑的收缩徐变和倾斜变形。

表 4 不同诱因下建筑变形特征

Table 4 Characteristics of building deformation under different inducing factors

变形诱因	LOS 向变形趋势	特征
温度	正弦函数	永久存在
收缩徐变	指数函数	建筑建成初期存在
地基固结	指数函数	受基础形式和地质条件影响大
土体滑坡	线性	易受降雨等因素影响而加剧
人为施工	线性	存在突发性和不确定性
矿区开挖	线性	存在突发性和不确定性
地下水位	无规律或季节性	受降雨和人为开采影响大
强降雨	短时沉降或隆起	受地质条件影响大

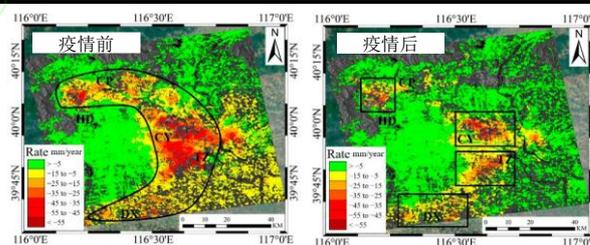


图 6 北京市沉降观测^[143]

Fig.6 Subsidence monitoring in Beijing

4 基于星载 InSAR 技术的建筑风险评估方法

基于星载 InSAR 技术获取的变形结果可分为时间维度上的变形时间序列,以及空间维度上的变形场分布。综合星载 InSAR 技术在时序观测精度、空间测点密度及观测广度上的优势,已有一些研究提出了基于星载 InSAR 技术的建筑风险评估方法。

4.1 风险评估前数据处理

一方面,由于 InSAR 技术获取的建筑变形序列难免含有噪声分量,因此有必要确定一个的稳定阈值区间,从而避免异常变形的误判。从表 5 可见,对于不同建筑结构变形监测场景,稳定阈值选择在 1~3mm/yr 可以获得较好的结果,这是与实际变形测量精度保持

一致的结果。值得注意的是，文献[147]选择了较大的5mm/yr作为阈值，这是因为该研究计算了建筑与地表

的相对变形，在对不同测点变形值进行差值运算时可能导致误差的叠加，因而需要对阈值进行适当放宽。

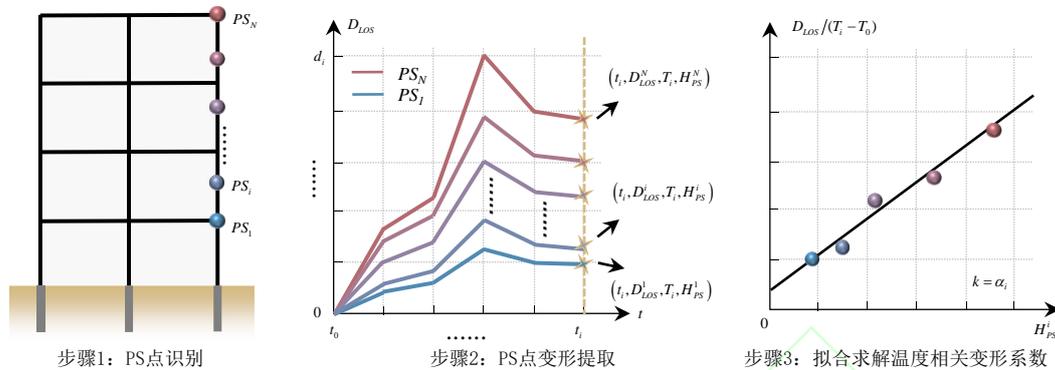


图7 温度相关变形系数求解流程^[109]

Fig.7 Procedure for solving temperature-related deformation coefficients

表5 变形稳定阈值

Table 5 Deformation stability threshold

文献	雷达波段	技术	监测场景	稳定阈值
[133]	C/X	PSI	土体滑移	±1.5~2mm/a
[134]	C/X	PSI	土体滑移	±2mm/a
[112]	C	PSI	多因素耦合	±1.5mm/a
[146]	X	SBAS	结构老化	±1.5mm/a
[61]	X	PSI	隧道开挖	±3mm/a
[147]	C	PSI	地基固结	±5mm/a

另一方面，由于广域监测获取的测点数量众多，采用必要的聚类算法可提高风险评估效率。其基本思想在于，对变形趋势类似的测点进行整合，在排除局部异常测点的同时，简化风险评估的计算程序。Mele等^[148]和 Sciortino等^[127]分别采用基于测点分布密度的DBSCAN聚类算法，和基于变形曲线趋势的k-means算法，实现了建筑测点的高效聚类。在此基础上，层次聚类算法^[140]和 SARClust算法^[149]则综合考虑了测点距离和变形趋势相似性进行聚类，更加适合单一建筑的精细化风险评估。此外，Martin等^[150]还借鉴高光谱解混技术提出用于InSAR变形结果处理的盲稀疏源分离(B-SSS)算法，并在建筑密集区准确识别了异常沉降、异常隆起及结构温度变形模式。

需要注意的是，聚类算法对风险评估效率的提高，是以降低测点密度和变形精度作为代价的。当对区域测点进行聚类处理后，同类测点的变形序列被均值或某一中间值替代，部分常变形可能被掩盖^[149]，从而导致风险评估结果的偏差。因此，在聚类前需要权衡风险评估的效率和精度，从而合理确定聚类算法参数。

4.2 基于时序变形分析的风险评估方法

本综述将仅利用变形时间序列开展建筑风险评估的方法归纳为基于时序变形分析的风险评估方法。其

常用的变形评价指标一般包括累计变形量、平均变形速率及变形趋势等。

鉴于致使建筑风险产生的原因是复杂多样的^[139]，因此，考察建筑风险与变形之间是否存在相关性，是基于星载InSAR技术开展建筑风险评估的重要前提。为此，Bardi等^[134]和 Ciampalini等^[133]基于星载InSAR技术对滑坡区域的建筑进行监测发现，变形速率与建筑损伤之间具有较高的正相关性。朱茂等^[151]的研究也发现，城市中的高风险建筑与星载InSAR技术观测到的异常变形建筑具有较高一致性。

由于此类方法仅考虑测点本身的变形时序，评估程序较为简单高效，因此得到了广泛的实际应用。Xu等^[152]以变形速率为指标，高效识别了兰州市城区发生持续沉降的高风险区。Ferretti等^[153]发现，倒塌建筑在事故发生前存在明显变形加速趋势。Antuñano等^[154]基于年变形趋势(TET)和最终演变趋势(FET)指标识别变形不稳定的潜在风险区域，结果与建筑倒塌区域具有较高一致性。由于此类方法没有对建筑结构的实际情况加以分析，因此在识别风险建筑时不可避免地存在一些错判和漏判现象。但具有积极意义的是，将此类风险评估方法与已有工程规范划定的建筑变形限值结合后，可对城市级的大范围建筑群开展高效的初步风险识别^[155]。此外，利用星载InSAR技术获取的丰富历史变形信息训练神经网络，还有望实现建筑未来变形趋势的预测和潜在风险的超前研判^{[156][157]}。在此类方法基础上，通过引入建筑密度、人口密度以及经济社会发展等方面信息，还可从风险严重程度和发生可能性出发，构建区域建筑风险评估矩阵，进一步拓展建筑风险评估的维度^[158]。

通过时序变形分析对建筑风险进行定性分析和初步识别之后，是否能够利用变形结果开展建筑风险量

化评估成为了进一步研究的重点。为此,一些学者试图建立建筑损伤程度与建筑累计变形或平均变形速率之间的映射关系,进而基于建筑累计变形或平均变形速率结果反演得到建筑的风险量化结果。Li 等^[125]对地震下的建筑损伤和建筑变形进行归一化处理后发现,土坯和砖混结构的变形与损伤之间存在线性关系,而砖木结构和钢筋混凝土框架结构的变形与建筑损伤呈二次函数关系。Ezquerro 等^[45]则基于建筑实测损伤结果和星载 InSAR 技术获取的建筑沉降值,拟合获得了建筑易损性曲线。在此基础上,结合有限元分析方法,可开展建筑在极端工况下的风险研判^[159]。

综合来看,已有基于时序变形分析开展建筑风险量化评估的研究,仅依据变形量或变形速率的不同对建筑风险等级进行简单划分^{[127][160]},导致方法的局限性十分明显。一是不同风险等级对应的变形区间难以界定,较大的主观性降低了风险评估结果的可靠性。二是忽略了不同变形模式对建筑风险的影响。例如,建筑结构弯曲、扭转变形相较于结构整体变形而言,可能导致的损伤风险可能更高。为提高风险评估的可靠性,一些研究尝试通过建立变形与建筑结构损伤的映射关系,从而提高风险评估的可靠度。然而,已有方法的不足亦十分明显。一是十分依赖前期建筑结构损伤勘察的准确性。但在实际勘察中,难以对所有建筑的内部损伤进行全方位勘察。同时,由于建筑外观装饰的存在,可能使得结构构件和非结构构件的损伤难以区分。在这些因素的影响下,建筑前期损伤勘察结果可能存在较大偏差,进而导致所获取易损性曲线的失真。二是易损性曲线需要通过既有的大量损伤案例拟合得到。因此,该风险评估方法的适用性十分有限,只针对某一特定建筑类型有效,而不具备迁移应用于无大量既有损伤的建筑群。因此,如何提高此类风险评估方法普适性和可靠性是进一步研究的关键。

4.3 基于时空变形分析的风险评估方法

基于时序变形分析的风险评估方法只关注独立测点的变形,忽略了不同测点间的相对变形关系。为更加深入分析星载 InSAR 技术获取的建筑变形结果,一些学者综合测点变形时序和空间位置,提出了一系列建筑风险评估方法,本文将此类方法归纳为基于时空变形分析的风险评估方法。

已有的研究表明,综合利用星载 InSAR 技术在时间和空间维度上的变形信息,可在一定程度上识别潜在的风险建筑。Mohamadi 等^[161]发现,在建筑物倒塌前,其周围往往会出现新热点(New Hot Spot)或新冷点(New Cold Spot)的变形速度时空格局。Yang 等^[116]将位于地面上的测点和位于建筑上的测点进行

区分,发现利用两类测点不同的相对变形模式,可以在空间上高效识别隧道开挖导致的风险建筑区。结合 SAR 卫星广阔的对地观测视野,这些时空变形分析方法进一步提升了星载 InSAR 技术在大范围建筑群风险筛查、识别及定位方面的优势。

进一步的研究表明,基于时空变形分析的风险评估方法有利于提高建筑风险评估的准确性。在区域建筑群观测尺度上,Barra 等^[162]的研究发现,如果单一利用变形速率进行滑坡区的建筑风险评估易导致误判,而依据空间变形梯度指标可提高风险建筑识别可靠度。Li 等^[118]则根据方向导数原理估计建筑区域倾斜度和曲率,提高了矿区建筑风险识别精度。在更加细观的单体建筑尺度上,Bonaldo 等^[146]的研究表明,建筑开裂损伤后不同空间位置测点的变形序列具有显著差异;Garcia 等^[76]在分析建筑异常变形分析时,除考虑变形量、变形速率和变形加速度指标外,在空间维度上加入检索测点密度的相关指标,发现可以有效提高建筑风险评估的可靠性。进一步地,一些研究基于观测到的 LOS 向变形结果,通过求解不均匀沉降量、倾斜角以及整体旋转角等三维变形指标评估建筑风险^{[140][163][164]},进一步提高了方法的可靠性和实用性^[165]。同时,获取三维变形指标的演化趋势^[166]有利于建立与现有相关工程规范的连接。

需要指出的是,风险评估需要同时考虑建筑结构的稳定性及其承载能力状态。然而,已有基于时空变形的建筑风险评估方法尚停留在宏观变形解析层面,导致其仅能对建筑结构的整体稳定性开展评估,无法对结构损伤开展深入解析。若要建立星载 InSAR 技术与结构损伤评估的联系,还需要依据获取的 LOS 向变形结果,进一步提出可靠且便于计算的风险评估指标体系。在此基础上,可从机理层次上解释建筑异常变形导致的结构损伤原因及位置,同时可从结构承载能力方面评判异常变形建筑接续使用的安全性。

4.4 基于与结构理论结合的风险评估

将星载 InSAR 技术获取的变形结果与土木工程领域的建筑结构理论结合,有利于从构件层面分析建筑结构状态,进而从根本上提高建筑风险评估的可靠性。此类风险评估方法的重点在于,如何实现从建筑变形到建筑结构内力的等效转化。这种风险评估方法可以借鉴结构力学理论中的“位移法”,即在结构形式已知情况下,以变形为输入,依据结构边界条件、构件刚度特性及变形协调原则反演结构内力。

然而,在实际应用中还面临结构形式复杂,建筑与土层间相互作用机制不明确的难题。当前,为解决结构形式复杂的难题,已有少数研究将建筑简化为带

有刚度的叠合梁模型^{[167][168]}，或无重力均质弹性梁模型^[169]，再基于星载 InSAR 技术获取的变形结果，求解结构构件最大拉应变研判建筑风险。但这种方法在建筑结构简化过程中，易因为设计参数估计的偏差导致风险评估结果可靠性下降。因此，直接建立建筑结构有限元分析模型有助于进一步提高风险评估的可靠度。如图 8 所示，将星载 InSAR 技术获取的变形结果作为有限元分析的输入，可更加细致研判异常变形导致的建筑结构风险，并准确识别处于不利受力状态的结构构件^{[170][171]}。此外，有限元分析还可基于温度场和材料特性的输入，对建筑自身特性诱发变形进行精细化模拟分析，其结果可与星载 InSAR 技术观测结果交互验证、对比分析，提高建筑结构变形观测结果的置信度。然而，这种与有限元结合的方法对建筑及其环境的先验信息提出了更加严格的要求。一方面，结构长期服役可能导致材料性能的退化，建筑有限元模型的校准问题需要进一步研究。另一方面，建筑与地基间的相互作用不可忽视，但准确定义土层特性及其与结构模型间的接触参数具有一定难度。

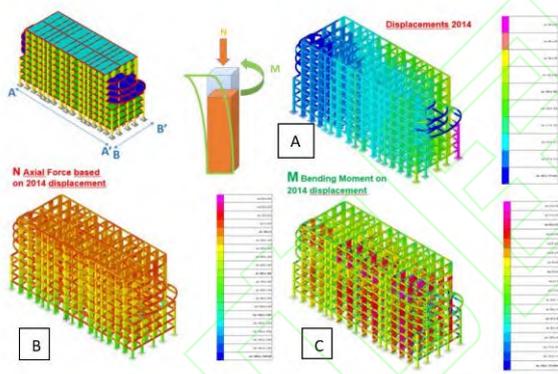


图 8 建筑结构有限元分析结果^[170]

Fig.8 Finite Element Analysis Results of Building Structures

5 多数据融合的技术发展趋势与应用实例

虽然星载 InSAR 技术在建筑风险评估方面展现出了较大的潜力，但在测点覆盖、监测频率、三维变形分解等方面还存在不足。为此，一些研究提出多源数据融合的建筑监测与风险评估方法，有望弥补星载 InSAR 技术的这些不足，逐渐成为当下建筑结构变形监测与风险评估的趋势。

5.1 多数据融合的建筑监测与风险评估

一是多源 SAR 卫星数据融合的监测方法。一方面，如 2.1 节所述，该方法能够增加建筑测点覆盖率。另一方面，多卫星的变形观测结果可以交叉校验，提高变形识别结果的可靠度^[133]。此外，该方法还有利于

建筑三维变形的反演。以图 9 升降轨融合观测为例，在获取建筑两个 LOS 向变形后，可通过几何投影转换得到建筑东西向和竖直向变形。进一步地，通过融合多颗卫星的观测结果，还有可能分解得到建筑的真三维变形^[172]。这有助于更加准确识别因土体滑移^{[44][135]}或建筑自身开裂^[131]导致的局部复杂变形。但需要注意的是，由于高层和大跨结构因温度差异导致的变形可能达到厘米级，因此 SAR 卫星在不同时间拍摄的影像尚不能直接用于此类建筑变形的三维分解。

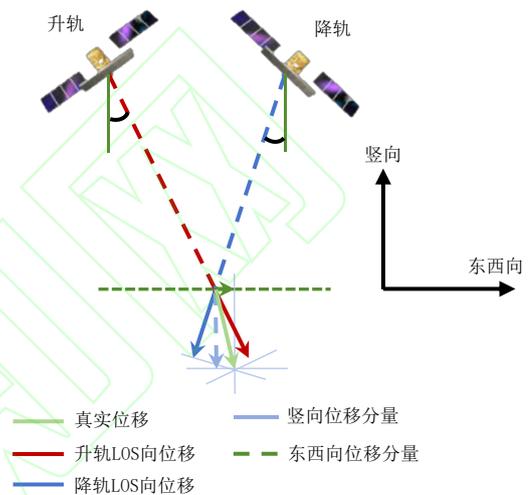


图 9 变形分解示意图^[131]

Fig.9 Diagram of deformation decomposition

二是天-空-地多种方式融合的监测方法。例如，星载 InSAR 技术与无人机倾斜摄影测量技术的结合，可提高区域建筑变形和损伤识别效率^{[42][132][173]}；与 GNSS 监测系统或地基合成孔径雷达（GBSAR）系统融合，有助于提高变形监测频率，并实现建筑三维变形的反演^{[85][83][114][134][174]}；与激光扫描等非接触式测量方式结合，有利于实现建筑内部与外部、局部与整体结合的精细变形分析^{[135][137][171][175]}；与原位传感器结合，可进一步提高变形监测频率并实现建筑风险实时预警^{[43][126][131][146][176]}。这些监测方法的融合可以在变形识别结果上互为校验，在空间覆盖率、采样频率等方面相互补充，进而构建从广域到局域的建筑群多尺度变形监测与风险预警体系^[177]。

三是与城市多源大数据融合开展建筑综合风险评估。如 3.4 节所述，建筑事故的发生往往是多致灾因素耦合的结果，因此在融合天-空-地多种监测方法基础上，结合建筑信息、施工规划、大气温度、水文地质、地形地貌等城市大数据，以及 SAR 卫星、气象卫星、光学卫星等对地遥感观测结果，研究各致灾因素耦合对建筑风险的影响，将有助于实现对建筑更加精细化监测和常态化风险评估。当前，已有一些研究结

合机器学习算法在复杂因果映射及未来预测方面的优势，分析了多致灾因素耦合对地面沉降^{[178][179]}和建筑风险^{[143][152][180]}的影响，进一步明确不同致灾因素间的耦合机制和建筑风险指标体系，是未来提高此类方法可靠度和适用性的关键。

5.2 建筑变形监测与风险评估实例

为更加直观说明星载 InSAR 技术特性，作者首先基于高分辨率的 COSMO-SkyMed 卫星影像数据，利用当前房屋监测中较为实用的 Tomo-PSInSAR 技术^[65]，给出某市建筑变形监测实例。此后，作者基于中分辨率的 Sentinel 卫星影像数据，以台北市建筑建筑群为例，将 PSI 观测技术与建筑结构理论结合，尝试建立“广域→区域→单体”的低层建筑群多尺度变形监测与风险评估体系，以期提高建筑风险评估可靠性。

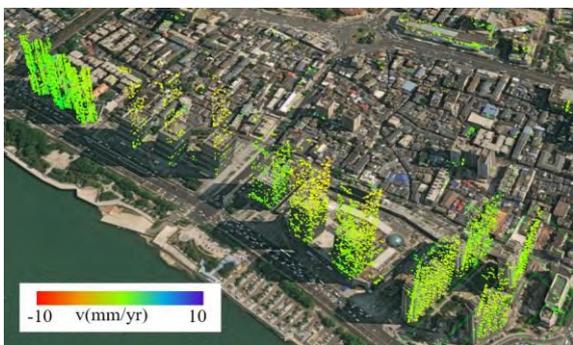


图 10 高层建筑变形速率

Fig.10 Deformation rate of high-rise buildings

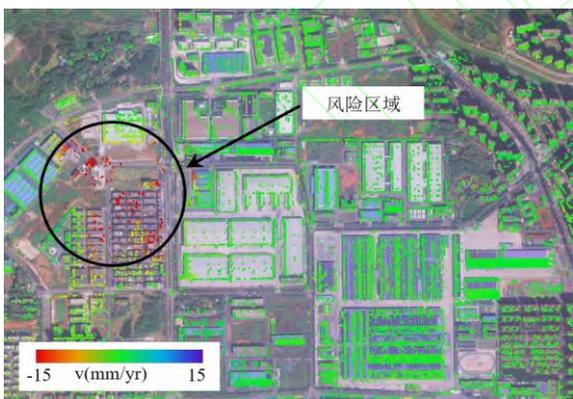


图 11 低层建筑变形速率

Fig.11 Deformation rate of low-rise buildings



图 12 建筑墙体裂缝

Fig.12 Cracks in building walls

5.2.1 基于高分辨率影像的建筑监测实例

图 10、图 11 为 2022 年 9 月至 2024 年 5 月共 21 景 COSMO-SkyMed 影像解析获取的某地区建筑变形速率结果。从空间维度的测点分布上来看，星载 InSAR 技术已经具备在单体建筑上获取大量变形测点的能力，这些测点极大节省了变形传感器的安装成本。对于高层建筑而言，由于 InSAR 技术每个测点的变形和高度是同时反演得到的，因此该技术还有望应用于建筑三维重构，这对搭建城市可视化监测平台是具有积极意义的。但值得注意的是，由于 SAR 卫星单侧斜视成像的特点，所有建筑测点都主要分布于建筑朝向卫星的两侧面上，无法通过单一视角的 SAR 影像获取建筑三维测点，这进一步体现了 5.1 节所述多卫星联合观测的意义。此外，图 10 也可见，在同一求解参属下，不同建筑的测点密度存在显著差异，这是由 2.1 节中所述各类原因造成的。

从时间维度的测点变形速率上来看，星载 InSAR 技术具备在大范围城市建筑群中筛查出存在异常变形建筑的能力。如图 11 所示，可见区域内存在一明显的沉降漏斗，最大变形速率超过 -15mm/yr 。经调查，该区域在改为建设用地前为大体量弃土填埋区，主要建筑结构形式为砌体结构，建筑使用年限约为 16 年。当地居民反映，区域内房屋在近年市政管道明挖施工后出现大范围开裂。从图 12 的部分房屋实地勘察照片可见，房屋内部承重墙严重开裂，部分墙体形成贯穿裂缝，严重威胁建筑安全。具有意义的是，星载 InSAR 技术有利于该区域的异常沉降原因溯源，并协助政府部门进一步排查、解决建筑安全隐患。

5.2.2 建筑群多尺度监测与风险评估实例

(1) 城市级广域变形分析与风险区域识别。为保证干涉影像对相干性和所识别测点的可靠性，变形求解过程中首先将影像集进行小基线处理。同时，作者采用考虑温度相位的干涉相位模型，提高城市中高层建筑变形反演精度。图 13 为台北市 2022 年全年竖向累计变形结果，可见在台北市东南区域存在一片明显的沉降风险区。

(2) 风险区域精细变形场分析。为避免高层建筑上季节性波动的温度变形对地表沉降场构建造成干扰，研究对区域内高层建筑测点进行了剔除，提出基于温度变形剔除的逆向距离权重插值法 (IDW)，提高区域的分阶段连续变形场的准确性。如图 14 所示，所获取的连续变形场能够清晰识别沉降场边界及其演化趋势。区域异常沉降原因可能与地下隧道施工和路面明挖施工有关。

(3) 开展单体建筑风险评估。作者在已有风险评

估方法中常用到的累计沉降、纵向倾斜角两项指标基础上，加入体现建筑横向倾斜的最大横倾角、体现结构损伤风险的纵向沉降曲线挠度比和横倾角曲线挠度比、以及体现未来沉降持续发展风险的近期沉降量，构成综合风险评估体系。其中，沉降曲线挠度比越大意味着建筑纵向弯曲越严重，易造成建筑顶部、底部受到附加压应力或拉应力，进而造成结构开裂损伤和承载能力下降；横倾角曲线挠度比越大意味着建筑横向扭转程度越严重，可能使建筑一些部位的拉压应力增大，从而进一步增大建筑安全风险。

(4) 建筑异常变形风险量化。为验证上述建筑风险评估指标的可靠性，作者选取了区域内 4 栋结构形式相近的建筑开展相对风险评估。结果如图 15 所示，B1、B2 两栋建筑相对具有更高的风险。此前新闻报道已证实这两栋建筑发生了更为严重的沉降及开裂损伤^{[181][182]}。值得注意的是，若不考虑结构损伤风险将导致 B1、B2 两栋建筑的风险被严重低估。通过此实例可见，相较于已有基于星载 InSAR 技术的风险评估方法，在提高星载 InSAR 技术变形观测精度基础上，将变形观测结果与结构理论的深度融合，可以有效提高建筑风险评估的可靠性。

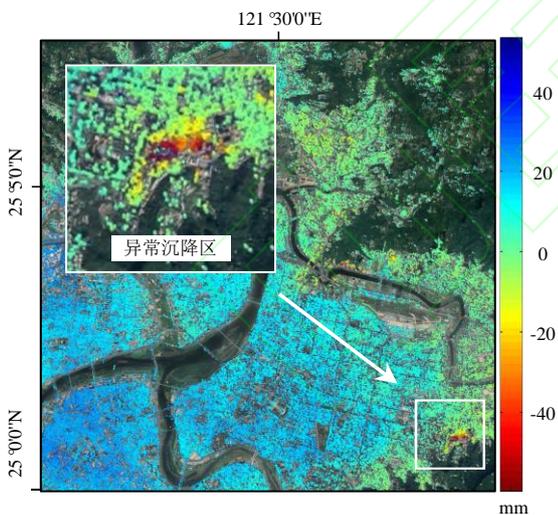


图 13 台北市广域变形场

Fig.13 Wide-area deformation field of taipei city

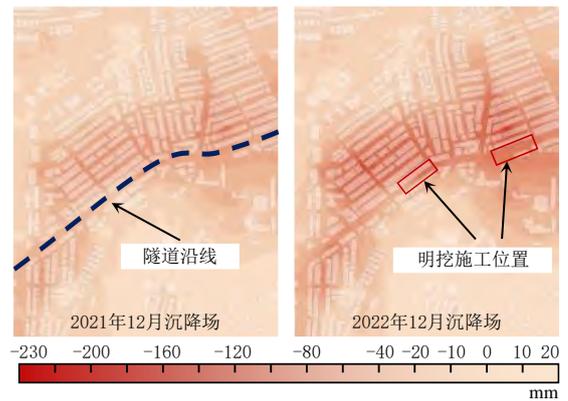


图 14 风险区域精细化变形场

Fig.14 Refined deformation field of high-risk areas

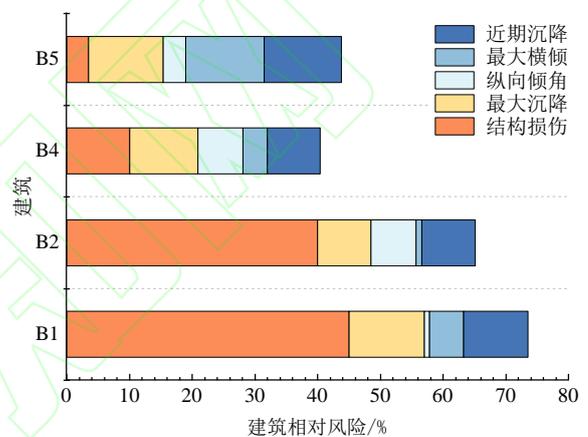


图 15 建筑风险评估结果

Fig.15 Results of building risk assessment

6 结论与展望

本文将遥感领域基于星载 InSAR 技术的变形观测技术与土木工程相关理论相结合，从方法的适用性、建筑变形类别、风险评估方法以及未来发展趋势等角度出发，系统性综述了星载 InSAR 技术在建筑结构变形监测与风险评估方面的研究与应用。相关内容充分证明了星载 InSAR 技术的应用潜力，不仅有利于促进星载 InSAR 技术在建筑结构健康监测领域的研究与应用，还有利于指导土木工程领域其它建筑结构风险评估方法的发展。综合已有研究，本文的主要结论与展望如下：

(1) 星载 InSAR 技术在建筑群监测广度和长时间监测精度方面具有显著优势。研究表明该技术实际变形测量精度普遍优于 5mm，可对大范围建筑群因自身特性、人为干扰、自然因素等诱发的变形进行精细化监测。此外，历史变形数据获取和定期重返监测是星载 InSAR 技术相较于传统监测方法的独特优势，可解决结构健康监测中无基线数据的瓶颈问题，并极大

提高城市级房屋安全监测的效率和效益。

(2) 本文综述了已有基于星载 InSAR 技术开展建筑风险评估的方法。结果表明,星载 InSAR 技术具备实现大范围建筑群风险评估的潜力,但现有方法多停留在建筑结构变形的宏观分析上,所采用的指标体系还不够完善。少部分研究探索将星载 InSAR 技术与建筑结构理论结合开展建筑风险评估,但相关方法的可靠性仍有待提升。面向未来,深入开展土木工程与 InSAR 观测技术的学科交叉研究,将有助于促进星载 InSAR 技术在建筑健康监测领域的长足发展。

(3) 星载 InSAR 技术测点识别不确定性、监测频率小、三维变形反演能力差的问题不可忽视。因此,单纯依赖该星载 InSAR 技术无法解决建筑结构变形监测与风险评估的所有问题,融合城市大数据、多源监测数据以及多种监测方式的变形监测与风险评估体系将是未来研究与应用的趋势。此外,这种多源融合的监测方法与深度学习算法结合,还有望研判建筑在多致灾因素耦合影响下的未来风险,进而实现建筑全生命周期的智慧化运维。

(4) 基于星载 InSAR 技术开展建筑变形监测的方法已取得了较为长足的发展,其未在实际工程中广泛应用的一大原因在于相关技术规范不够完善。当前,仅中国工程建设标准化协会制定了《建筑安全星载干涉雷达监测技术规程》(T/CECS 1165-2022)^[183]。进一步完善星载 InSAR 技术面向建筑监测的相关规范体系,对在建筑结构变形监测和风险评估时所涉及的技术细节进行详尽约束,将极大提高该技术的可靠性和公信力,有助于加快技术的大范围应用普及,并助力未来“城市体检”机制的实现。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.《第一次全国自然灾害综合风险普查公报》发布[EB/OL]. [2024-05-09]. https://www.mohurd.gov.cn/xinwen/gzdt/202405/20240509_777863.html

[2] 中华人民共和国中央人民政府. 城镇老旧小区改造明确施工图[EB/OL]. [2024-07-22]. https://www.gov.cn/zhengce/2020-07/22/content_5528949.htm

[3] 卢文刚, 陈洋. 基于“三维”模型的城市房屋坍塌重大安全事故应急治理研究——以泉州欣佳酒店“3·7”坍塌事故为例[J]. 中国应急救援, 2024, (02): 18-25.

[4] 银赛红. 建筑倒塌事故被困人员救援对策研究——以湖南长沙“4·29”居民自建房倒塌事故救援为例[J]. 中国应急救援, 2023, (02): 15-20.

[5] Jiang H, Balz T, Li J, et al. Preliminary Investigation of Sudden Ground Subsidence and Building Tilt in Balitai Town, Tianjin City, on 31 May 2023[J]. Remote Sensing,

2023, 15(19): 4891.

[6] 黑龙江应急管理厅. 齐齐哈尔第三十四中学校“7·23”重大坍塌事故调查报告[EB/OL]. [2024-02-08]. http://yjgl.hlj.gov.cn/yjgl/c104120/202402/c003170910_8.shtml

[7] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央办公厅 国务院办公厅印发《关于推进城市安全发展的意见》[EB/OL]. [2018-01-07]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2018/content_5257371.htm

[8] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[J]. 中国人大, 2022, (21): 6-21.

[9] 李强. 政府工作报告[EB/OL]. [2024-03-05]. https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue_11246/202403/content_6941846.html

[10] 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]. 工程力学, 1-9 [2024-04-03]. (Yue Qingrui, Lu Xinzhen, 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))

[11] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院安委会办公室关于印发《城市安全风险综合监测预警平台建设指南(2023版)》的通知[EB/OL]. [2023-11-19]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6916861.htm

[12] 中华人民共和国中央人民政府. 住房和城乡建设部关于全面开展城市体检工作的指导意见[EB/OL]. [2023-11-29]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202312/content_6918801.htm

[13] 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))

[14] 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.

[15] 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))

[16] 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.

[17] 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 Xiaoqiong, 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))
- [18] 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))
- [19] 吴涛, 王超, 张红. DInSAR技术的最新进展[J]. 遥感信息, 2007, No.89(1):84-89. (Wu Tao, Wang Chao, Zhang Hong. A Review on Latest Differential InSAR[J]. *Researches Remote Sensing Information*. 2007, No.89 (1):84-89. (in Chinese))
- [20] 高胜, 曾琪明, 焦健, 等. 永久散射体雷达干涉研究综述[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(1):86-94. (Gao Sheng, Zeng Qiming, Jiao Jian, et al. A Review on Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar[J]. *Remote Sensing Technology and Application*. 2016, 31(1):86-94. (in Chinese))
- [21] Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-González M, et al. Persistent Scatterer Interferometry: A review[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 115: 78-89.
- [22] Osmanoğlu B, Sunar F, Wdowinski S, et al. Time series analysis of InSAR data: Methods and trends[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 115: 90-102.
- [23] Li S, Xu W, Li Z. Review of the SBAS InSAR Time-series algorithms, applications, and challenges[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2022, 13(2): 114-126.
- [24] 林琚, 马培峰, 陈旻, 等. SAR层析成像的基本原理、关键技术和应用领域[J]. 测绘地理信息, 2015, 40(3):1-5. (Lin Hui, Ma Peifeng, Chen Min, et al. Basic principles, key techniques and applications of tomographic SAR imaging[J]. *Journal of Geomatics*, 2015, 40(3):1-5. (in Chinese))
- [25] 张月, 庞蕾, 徐西桂, 等. 差分层析 SAR 技术研究现状分析[J]. 测绘通报, 2019(1):5-12. (Zhang Yue, Pang Lei, Xu Xigui, et al. The research status analysis of differential TomoSAR[J]. *Bulletin Of Surveying And Mapping*, 2019(1):5-12. (in Chinese))
- [26] 朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR 变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10):1717-1733. (Zhu Jianjun, Li Zhiwei, Hu Jun. Research Progress and Methods of InSAR for Deformation Monitoring[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*. 2017, 46(10):1717-1733. (in Chinese))
- [27] Zhu X X, Wang Y, Montazeri S, et al. A Review of Ten-Year Advances of Multi-Baseline SAR Interferometry Using TerraSAR-X Data[J]. *Remote Sens*. 2018, 10(9): 1374.
- [28] Noviello C, Verde S, Zamparelli V, et al. 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.
- [29] Ma P, Lin H, Wang W, et al. Toward Fine Surveillance: A review of multitemporal interferometric synthetic aperture radar for infrastructure health monitoring[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2022, 10(1): 207-230.
- [30] 高明亮, 宫辉力, 陈蓓蓓, 等. 基于 InSAR 技术的地表三维形变获取方法综述[J]. 测绘通报, 2017(1):1-4. (Gao Mingliang, Gong Huili, Chen Beibei, et al. Review of Three-dimensional Surface Deformation Acquisition from InSAR Measurements and Its Application[J]. *Bulletin Of Surveying And Mapping*, 2017(1): 1-4. (in Chinese))
- [31] 秦晓琼. 时间序列 D-InSAR 城市基础设施精细形变测量研究[D]. 武汉大学, 2019: 15-17. (Qin Xiaoqiong. Refined deformation measurement of urban infrastructures based on the time-series DInSAR technique[D]. Wuhan University, 2019: 15-17. (in Chinese))
- [32] Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B7): 9183-9191.
- [33] Bamler R, Philipp H. Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Inverse problems*, 1998, 14(4): R1.
- [34] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(3): 333-382.
- [35] 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.
- [36] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8-20.
- [37] 王彦兵, 王聪, 赵亚丽, 等. 基于 ROC 曲线的永久散射体

- 识别最佳阈值定量筛选[J]. 遥感学报, 2021, 25(10): 2083-2094. (Wang Yanbing, Wang Cong, Zhao Yali, et al. Quantitative determination of the optimal threshold of Permanent Scatterer based on ROC Curve[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(10): 2083-2094. (in Chinese))
- [38] 罗小军, 黄丁发, 刘国祥. 时序差分雷达干涉中的永久散射体自动探测[J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(4): 414-428.(Luo Xiaojun, Huang Dingfa, Liu Guoxiang. Automated Detection of Permanent Scatterers in Time Serial Differential Radar Interferometry[J]. Journal of Southwest Jiaotong University. 2007, 42(4): 414-418. (in Chinese))
- [39] Costantini M, Falco S, Malvarosa F, et al. Persistent Scatterer Pair Interferometry: Approach and Application to COSMO-SkyMed SAR Data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(7): 2869-2879.
- [40] Monserrat O, Crosetto M, Cuevas M, et al. The Thermal Expansion Component of Persistent Scatterer Interferometry Observations[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(5): 864-868.
- [41] Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, et al. A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(9): 3460-3470.
- [42] Zhou W, Chen F, Guo H. Differential Radar Interferometry for Structural and Ground Deformation Monitoring: A New Tool for the Conservation and Sustainability of Cultural Heritage Sites[J]. Sustainability, 2015, 7(2): 1712-1729.
- [43] Ciampalini A, Farina P, Lombardi L, et al. Integration of Satellite InSAR with a Wireless Network of Geotechnical Sensors for Slope Monitoring in Urban Areas: The Pariana Landslide Case (Massa, Italy)[J]. Remote Sensing, 2021, 13(13).
- [44] Barla G, Tamburini A, Del Conte S, et al. InSAR monitoring of tunnel induced ground movements[J], Geomechanics and Tunnelling, 2016, 9(1): 15-22.
- [45] 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).
- [46] Chen F, Lin H, Zhang Y, et al. Ground subsidence geo-hazards induced by rapid urbanization: implications from InSAR observation and geological analysis[J]. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2012, 12(4): 935-942.
- [47] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [48] Sansosti E, Manunta M, Casu F, et al. Radar remote sensing from space for surface deformation analysis: present and future opportunities from the new SAR sensor generation[J]. Rendiconti Lincei-Scienze Fisiche E Naturali, 2015, 26: S75-S84.
- [49] Bonano M, Manunta M, Pepe A, et al. From Previous C-Band to New X-Band SAR Systems: Assessment of the DInSAR Mapping Improvement for Deformation Time-Series Retrieval in Urban Areas[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(4): 1973-1984.
- [50] Goel K, Adam N. Fusion of Monostatic/Bistatic InSAR Stacks for Urban Area Analysis via Distributed Scatterers[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(4): 733-737.
- [51] Hooper A. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(16).
- [52] Balz T, Wei L, Jendryke M, et al. TomoSAR and PS-InSAR analysis of high-rise buildings in berlin[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Munich, Germany: IEEE Geosci & Remote Sensing Soc, 2012: 447-450.
- [53] Pasquali P, Prati C, Rocca F, et al. A 3-D SAR experiment with EMSL data[C]// 1995 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'95. Quantitative Remote Sensing for Science and Applications. Firenze, Italy: IEEE, 1995: 784-786 vol.1.
- [54] Reigber A, Moreira A. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2142-2152.
- [55] Lombardini F. Differential tomography: A new framework for SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(1): 37-44.
- [56] Fornaro G, Reale D, Serafino F. Four-Dimensional SAR Imaging for Height Estimation and Monitoring of Single and Double Scatterers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(1): 224-237.
- [57] Reale D, Fornaro G, Pauciuolo A. Extension of 4-D SAR Imaging to the Monitoring of Thermally Dilating

- Scatterers[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(12): 5296-5306.
- [58] 建筑与桥梁结构监测技术规范: GB5092-2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Technical code for monitoring of building and bridge structures: GB5092-2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))
- [59] 工程测量标准: GB50026-2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020. (Standard for engineering surveying: GB50026-2020[S]. Beijing: Beijing China Planning Publishing House, 2020. (in Chinese))
- [60] 危险房屋鉴定标准: JGJ 125-2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. (Standard for dangerous building appraisal: JGJ 125-2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese))
- [61] 杨梦诗, 廖明生, 常玲, 等. 城市场景时序 InSAR 形变解译: 问题分析与研究进展[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(10): 1643-1660. (Yang Mengshi, Liao Mingsheng, Chang Ling, et al. Interpretation of Multi-epoch InSAR Deformation for Urban Scenes: A Problem Analysis and Literature Review[J]. *Wuhan Daxue Xuebao (Xinxi Kexue Ban)/Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 48(10), 1643-1660. (in Chinese))
- [62] Adam N, Eineder M, Yague-Martinez N, et al. High Resolution Interferometric Stacking with TerraSAR-X[C]// *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Boston, MA, USA: IEEE, 2008: II-117-II-120.
- [63] Crosetto M, Monserrat O, Iglesias R, et al. Persistent Scatterer Interferometry: Potential, Limits and Initial C- and X-band Comparison[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2010, 76(9): 1061-1069.
- [64] Perissin D, Wang Z, Lin H. Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 73: 58-67.
- [65] Ma P F, Lin H. Robust Detection of Single and Double Persistent Scatterers in Urban Built Environments[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(4): 2124-2139.
- [66] Reale D, Fornaro G, Pauciuolo A, et al. Tomographic Imaging and Monitoring of Buildings With Very High Resolution SAR Data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(4): 661-665.
- [67] Fornaro G, Pauciuolo A, Reale D, et al. Peculiarities of urban area analysis with very high resolution interferometric SAR data[C]// *2011 Joint Urban Remote Sensing Event*. Munich, Germany: IEEE, 2011: 185-188.
- [68] Zhu X X, Bamler R. Demonstration of Super-Resolution for Tomographic SAR Imaging in Urban Environment[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(8): 3150-3157.
- [69] Wu W, Hu J, Du Z, et al. A Network Optimized Ridge Estimator for Robust PSI Parameter Estimation and Its Application on Deformation Monitoring of Urban Area[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 5436-5452.
- [70] Gernhardt S, Cong X, Eineder M, et al. Geometrical Fusion of Multitrack PS Point Clouds[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(1): 38-42.
- [71] Wang Y, Zhu X X. Automatic Feature-Based Geometric Fusion of Multiview TomoSAR Point Clouds in Urban Area[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(3): 953-965.
- [72] Liu G, Jia H, Zhang R, et al. Exploration of Subsidence Estimation by Persistent Scatterer InSAR on Time Series of High Resolution TerraSAR-X Images[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2011, 4(1): 159-170.
- [73] Gernhardt S, Adam N, Eineder M, et al. Potential of very high resolution SAR for persistent scatterer interferometry in urban areas[J]. *Annals of GIS*, 2010, 16(2): 103-111.
- [74] 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.
- [75] Serrano-Juan A, Pujades E, Vazquez-Sune E, et al. Leveling vs. InSAR in urban underground construction monitoring: Pros and cons. Case of la sagrera railway station (Barcelona, Spain)[J]. *Engineering Geology*, 2017, 218: 1-11.
- [76] Garcia A, Gonzalez-Rodrigo B, Martinez S, et al. Building health monitoring in the old town of Madrid: applicability of SAR Imagery to the monitoring of underground works through classification indexes[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2021, 14(3): 271-287.
- [77] Perissin D, Prati C, Rocca F, et al. Multi-track PS analysis in Shanghai[J]. *Proc. ENVISAT 200*, 2007, 23-32.
- [78] Zeni G, Bonano M, Casu F, et al. Long-term deformation analysis of historical buildings through the advanced SBAS-DInSAR technique: the case study of the city of

- Rome, Italy[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2011, 8(3): S1-S12.
- [79] Karila K, Karjalainen M, Hyypä 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.
- [80] Yang K, Yan L, Huang G, et al. Monitoring Building Deformation with InSAR: Experiments and Validation[J]. *Sensors*, 2016, 16(12).
- [81] Osmanoglu B, Dixon T H, Wdowinski S, et al. Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(1): 1-12.
- [82] Poreh D, Pirasteh S, Cabral-Cano E. Assessing subsidence of Mexico City from InSAR and LandSat ETM plus with CGPS and SVM[J]. *Geoenvironmental Disasters*, 2021, 8(1).
- [83] Fabris M, Battaglia M, Chen X, et al. An Integrated InSAR and GNSS Approach to Monitor Land Subsidence in the Po River Delta (Italy)[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(21).
- [84] Ng A H-M, Liu Z, Du Z, et al. A novel framework for combining polarimetric Sentinel-1 InSAR time series in subsidence monitoring-A case study of Sydney[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 295.
- [85] Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-Gonzalez M, et al. Measuring thermal expansion using X-band persistent scatterer interferometry[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 100: 84-91.
- [86] Ciampalini A, Solari L, Giannecchini R, et al. Evaluation of subsidence induced by long-lasting buildings load using InSAR technique and geotechnical data: The case study of a Freight Terminal (Tuscany, Italy)[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 82.
- [87] Li F, Gong H, Chen B, et al. Understanding the Influence of Building Loads on Surface Settlement: A Case Study in the Central Business District of Beijing Combining Multi-Source Data[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(16).
- [88] 陈蓓蓓, 宫辉力, 李小娟, 等. PS-InSAR 技术与多光谱遥感建筑指数的载荷密度对地面沉降影响的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(8): 2198-2202. (Chen Beibei, Gong Huilin, Li Xiaojuan, et al. The Impact of load density differences on land subsidence based on build-up index and PS-InSAR technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33 (8): 2198-2202. (in Chinese))
- [89] 陈蓓蓓, 宫辉力, 李小娟, 等. 北京典型地下水漏斗区载荷密度与地面沉降相关性[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21(6): 1046-1056. (Chen Beibei, Gong Huili, Li Xiaojuan, et al. Relationship Between Load Density and Land Subsidence in typical groundwater funnel area of Beijing, China[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013, 21 (6): 1046-1056. (in Chinese))
- [90] 周朝栋, 宫辉力, 张有全, 等. 基于 PS-InSAR 和 GIS 的北京平原区建筑荷载对地面沉降的影响[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(11): 1551-1562. (Zhou Chaodong, Gong Huili, Zhang Youquan, et al. The Influence of Building Load to Land Subsidence in Beijing Plain based on PS-InSAR and GIS[J]. *Journal of Geo-information Science*, 18(11): 1551-1562. (in Chinese))
- [91] Ardizzone F, Bonano M, Giocoli A, et al. Analysis of ground deformation using SBAS-DInSAR technique applied to COSMO-SkyMed images, the test case of Roma urban area[C]// *Conference on SAR Image Analysis, Modeling and Techniques XII*. Edinburgh, Scotland: SPIE, 2012: 67-75.
- [92] Bateson L, Novellino A, Hussain E, et al. Urban development induced subsidence in deltaic environments: A case study in Hanoi, Vietnam[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 125.
- [93] Stramondo S, Bozzano F, Marra F, et al. Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(6): 3160-3172.
- [94] Bozzano F, Ciampi P, Del Monte M, et al. Satellite A-DInSAR monitoring of the Vittoriano Monument (Rome, Italy): implications for heritage preservation[J]. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 2020, 20(2): 5-17.
- [95] Lan H, Li L, Liu H, et al. Complex Urban Infrastructure Deformation Monitoring Using High Resolution PSI[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(2): 643-651.
- [96] De Wit K, Lexmond B R, Stouthamer E, et al. Identifying Causes of Urban Differential Subsidence in the Vietnamese Mekong Delta by Combining InSAR and Field Observations[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(2).
- [97] 赵富萌, 陈冠, 张毅, 等. 基于 SBAS 技术的兰州新区地面沉降监测研究[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(6): 707-715. (Zhao Fumeng, Chen Guan, Zhang Yi, et al.

- Land subsidence monitoring in Lanzhou New District based on SBAS technology[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2019, 55(6): 707-715. (in Chinese)
- [98] 陈有东, 张立峰, 何毅, 等. 兰州新区地表形变与土地利用类型关系研究[J]. *测绘科学*, 2021, 46(10): 80-89+117. (Chen Youdong, Zhang Lifeng, He Yi, et al. Research on the relationship between land deformation and land use types in Lanzhou new district[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(10): 80-89+117. (in Chinese))
- [99] Ramirez R A, Abdullah R E E, Rubio C J P. S1-PSInSAR monitoring and hyperbolic modeling of nonlinear ground subsidence in Naga City, Cebu Island in the Philippines[J]. *International Journal of Geomate*, 2022, 23(100): 102-109.
- [100] Li G. The self-adaptive observation method of the large-scale building settlement based on InSAR mapping[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(19).
- [101] Parsons T, Wu P-C, Wei M, et al. The Weight of New York City: Possible Contributions to Subsidence From Anthropogenic Sources[J]. *Earths Future*, 2023, 11(5).
- [102] Eineder M, Adam N, Bamler R, et al. Spaceborne Spotlight SAR Interferometry With TerraSAR-X[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(5): 1524-1535.
- [103] Ma PF, Zheng Y, Zhang Z J, et al. Building risk monitoring and prediction using integrated multi-temporal InSAR and numerical modeling techniques[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 114: 103076.
- [104] 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: 68-79.
- [105] Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-González M, et al. Analysis of x-band very high resolution persistent scatterer interferometry data over urban areas[C]// *International-Society-for-Photogrammetry-and-Remote-Sensing Hannover Workshop*. Hannover, Germany: Int Soc Photogrammetry & Remote Sensing, 2013: 47-51.
- [106] Wu W, Cui H, Hu J, et al. Detection and 3D Visualization of Deformations for High-Rise Buildings in Shenzhen, China from High-Resolution TerraSAR-X Datasets[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2019, 9(18).
- [107] Ma P, Lin H, Lan H, et al. Multi-dimensional SAR tomography for monitoring the deformation of newly built concrete buildings[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, : 118-128.
- [108] Budillon A, Schirinzi G. Remote Monitoring of Civil Infrastructure Based on TomoSAR[J]. *Infrastructures*, 2022, 7(4).
- [109] Zhou Y, Chen J W, Hao G W, et al. Deformation Monitoring of High-Rise Building Clusters: Acquiring Deformation Coefficients by Combining Satellite Imagery and Persistent Scatterer Interferometry[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2024, 2024: 2326106.
- [110] Zhou, L F, Ma, P F, Xia, Y, et al. Monitoring the deformation of high-rise buildings in Shanghai Lujiazui zone by Tomo-PSInSAR[C]// *ISPRS TC III Mid-term Symposium*. Beijing, China: ISPRS, 2018, XLII-3, 2535-2539.
- [111] Gernhardt S, Bamler R, Ieee. Structural deformation and non-seasonal motion of single buildings in urban areas revealed by PSI[C]// *Joint Urban Remote Sensing Event*. Lausanne, Switzerland: Ecole Polytechnique Fed Lausanne, 2015:1-4.
- [112] Pratesi F, Tapete D, Del Ventisette C, et al. Mapping interactions between geology, subsurface resource exploitation and urban development in transforming cities using InSAR Persistent Scatterers: Two decades of change in Florence, Italy[J]. *Applied Geography*, 2016, 77: 20-37.
- [113] Hussain M A, Chen Z, Zheng Y, et al. PS-InSAR Based Monitoring of Land Subsidence by Groundwater Extraction for Lahore Metropolitan City, Pakistan[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(16).
- [114] Gumilar I, Sidiq T P P, Virtriana R, et al. Geodetic observations confirming land subsidence of Bandung Basin, Indonesia, and subsequent building damage[J]. *ACTA Geodaetica Et Geophysica*, 2023, 58(3): 373-388.
- [115] Giardina G, Milillo P, Dejong M J, et al. Evaluation of InSAR monitoring data for post-tunnelling settlement damage assessment[J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2019, 26(2).
- [116] Yang M, Wang R, Li M, et al. A PSI targets characterization approach to interpreting surface displacement signals: A case study of the Shanghai metro tunnels[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 280.
- [117] Perissin D, Wang Z, Lin H. Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 73: 58-67.
- [118] Li Y X, Yang K M, Zhang J H, et al. Research on time series

- InSAR monitoring method for multiple types of surface deformation in mining area[J]. *Natural Hazards*, 2022, 114(3): 2479-2508.
- [119] 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.
- [120] 蔡逸, 苏小四, 朱琳, 等. 基于 InSAR 技术的大庆市地面变形监测与成因分析[J]. *安全与环境工程*, 2023, 30(4): 173-181. (Cai Yi, Su Xiaosi, Zhu Lin, et al. Land deformation monitoring and causal analysis in Daqing City based on InSAR technology[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2023, 30(4): 173-181. (in Chinese))
- [121] 吴平, 袁存忠. 基于 PS-InSAR 技术的泉州欣佳怡酒店建筑沉降分析[J]. *地理空间信息*, 2021, 19(4): 105-108+8.
- [122] 汪韬阳, 李熙, 田礼乔, 等. 城市建筑群航天遥感动态监测[J/OL]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 1-17[2024-07-07]. (Wang Taoyang, Li Xi, Tian Liqiao, et al. Space remote sensing dynamic monitoring for urban complex[J/OL]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 1-17[2024-07-07]. (in Chinese))
- [123] 方杰. InSAR 在城市地表和建筑坍塌形变监测中的应用[D]. *安徽建筑大学*, 2023: 50-55. (Fang Jie. The application of InSAR in monitoring the deformation of urban surface and building collapse[D]. *Anhui Jianzhu University*, 2023: 50-55. (in Chinese))
- [124] Du Y N, Feng D C, Wu G. InSAR-based rapid damage assessment of urban building portfolios following the 2023 Turkey earthquake[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2024, 103: 104317.
- [125] Li Q, Wang W, Wang J, et al. Exploring the relationship between InSAR coseismic deformation and earthquake-damaged buildings[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 262.
- [126] Caprino A, Puliero S, Lorenzoni F, et al. Satellite SAR Interferometry and On-Site Traditional SHM to Monitor the Post-Earthquake Behavior of the Civic Tower in L'Aquila (Abruzzo Region, Italy)[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(6): 1587.
- [127] Sciortino A, Marini R, Guerriero V, et al. Satellite A-DInSAR pattern recognition for seismic vulnerability mapping at city scale: insights from the L'Aquila (Italy) case study[J]. *Giscience & Remote Sensing*, 2024, 61(1).
- [128] 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.
- [129] Zhang H, Zeng R, Zhang Y, et al. Subsidence monitoring and influencing factor analysis of mountain excavation and valley infilling on the Chinese Loess Plateau: A case study of Yan'an New District[J]. *Engineering Geology*, 2022, 297.
- [130] Han L, Cao L, Wu Q, 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, 13(24).
- [131] Cavalagli N, Kita A, Falco S, et al. Satellite radar interferometry and in-situ measurements for static monitoring of historical monuments: The case of Gubbio, Italy[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 235.
- [132] Maria Mateos R, Azanon J M, Roldan F J, et al. The combined use of PSInSAR and UAV photogrammetry techniques for the analysis of the kinematics of a coastal landslide affecting an urban area (SE Spain)[J]. *Landslides*, 2017, 14(2): 743-754.
- [133] Ciampalini A, Bardi F, Bianchini S, et al. Analysis of building deformation in landslide area using multisensor PSInSAR™ technique[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 33: 166-180.
- [134] Bardi F, Frodella W, Ciampalini A, et al. Integration between ground based and satellite SAR data in landslide mapping: The San Fratello case study[J]. *Geomorphology*, 2014, 223: 45-60.
- [135] Reale D, Noviello C, Verde S, et al. A multi-disciplinary approach for the damage analysis of cultural heritage: The case study of the St. Gerlando Cathedral in Agrigento[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 235.
- [136] Meisina C, Zucca F, Fossati D, et al. Ground deformation monitoring by using the Permanent Scatterers Technique: The example of the Oltrepo Pavese (Lombardia, Italy)[J]. *Engineering Geology*, 2006, 88(3-4): 240-259.
- [137] Chen X, Achilli V, Fabris M, et al. Combining Sentinel-1 Interferometry and Ground-Based Geomatics Techniques for Monitoring Buildings Affected by Mass Movements[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(3).
- [138] Bassoli E, Vincenzi L, Grassi F, et al. A multi-temporal DInSAR-based method for the assessment of the 3D rigid motion of buildings and corresponding uncertainties[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 73.
- [139] Frattini P, Crosta G B, Allievi J. Damage to Buildings in

- Large Slope Rock Instabilities Monitored with the PSInSAR™ Technique[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(10): 4753-4773.
- [140] Zhu M, Wan X, Fei B, et al. Detection of Building and Infrastructure Instabilities by Automatic Spatiotemporal Analysis of Satellite SAR Interferometry Measurements[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11).
- [141] 秦晓琼, 廖明生, 杨梦诗, 等. 应用高分辨率PS-InSAR技术监测上海动迁房歪斜形变[J]. *测绘通报*, 2016,(6): 18-21+86. (Qin Xiaoqiong, Liao Mingsheng, Yang Mengshi, et al. Monitoring Shanghai relocation housing skew deformation using high resolution PS-InSAR Technology[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016,(6): 18-21+86. (in Chinese))
- [142] Gao H, Xiong L, Chen J, et al. Surface Subsidence of Nanchang, China 2015-2021 Retrieved via Multi-Temporal InSAR Based on Long- and Short-Time Baseline Net[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(13).
- [143] Sheng H, Zhou L, Huang C, et al. Surface Subsidence Characteristics and Causes in Beijing (China) before and after COVID-19 by Sentinel-1A TS-InSAR[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(5).
- [144] Chen F, Guo H, Ma P, et al. Radar interferometry offers new insights into threats to the Angkor site[J]. *Science Advances*, 2017, 3(3).
- [145] Chen F, Zhou W, Chen C, et al. Extended D-TomoSAR Displacement Monitoring for Nanjing (China) City Built Structure Using High-Resolution TerraSAR/TanDEM-X and Cosmo SkyMed SAR Data[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(22).
- [146] Bonaldo G, Caprino A, Lorenzoni F, et al. Monitoring Displacements and Damage Detection through Satellite MT-InSAR Techniques: A New Methodology and Application to a Case Study in Rome (Italy)[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(5).
- [147] De Wit K, Lexmond B R, Stouthamer E, et al. Identifying Causes of Urban Differential Subsidence in the Vietnamese Mekong Delta by Combining InSAR and Field Observations[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(2).
- [148] Mele A, Vitiello A, Bonano M, et al. On the Joint Exploitation of Satellite DInSAR Measurements and DBSCAN-Based Techniques for Preliminary Identification and Ranking of Critical Constructions in a Built Environment[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(8).
- [149] Roque D, Falcao A P, Perissin D, et al. SARClust-A New Tool to Analyze InSAR Displacement Time Series for Structure Monitoring[J]. *Sustainability*, 2023, 15(4).
- [150] Martin G, Hooper A, Wright T J, et al. Blind Source Separation for MT-InSAR Analysis With Structural Health Monitoring Applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15: 7605-7618.
- [151] 朱茂, 葛春青, 班勇, 等. 基于 InSAR 的城市建筑安全监测技术研究[J]. *工业建筑*, 2024, 54(2): 51-57. (Zhu Mao, Ge Chunqing, Ban Yong, et al. Research on urban building safety monitoring techniques based on InSAR[J]. *Industrial Construction*, 2024, 54(2): 51-57. (in Chinese))
- [152] Xu Y, Wu Z, Zhang H, et al. Land Subsidence Monitoring and Building Risk Assessment Using InSAR and Machine Learning in a Loess Plateau City-A Case Study of Lanzhou, China[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(11).
- [153] Ferretti A, Ferrucci F, Prati C, et al. SAR analysis of building collapse by means of the permanent scatterers technique[C]// IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120). Honolulu, HI, USA: IEEE, 2000: 3219-3221 vol.7.
- [154] Rodriguez-Antunano I, Martinez-Sanchez 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).
- [155] 夏锐, 李铁, 张景发, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的 M 矿区沉降监测与建筑群安全性研究[J]. *自然灾害学报*, 2022, 31(3): 175-183. (Xia Rui, Li Tie, Zhang Jingfa, et al. Study on settlement monitoring and safety of buildings in M mining area based on SBAS-InSAR technology[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(3): 175-183. (in Chinese))
- [156] Ma C, Lu B. Prediction of the Deformation of Heritage Building Communities under the Integration of Attention Mechanisms and SBAS Technology[J]. *Electronics*, 2023, 12(23).
- [157] 毕凌宇, 孙承志, 乔申. 基于 SBAS-InSAR 与 MA-PSO-BP 的南京河西地区地表沉降监测及预测分析[J]. *测绘通报*, 2024(4): 48-53. (Bi Lingyu, Sun Chengzhi, Qiao Shen. Surface subsidence monitoring and predictive analysis in hexi area of Nanjing based on SBAS-InSAR and MA-PSO-BP[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2024(4): 48-53. (in Chinese))

- [158] Nduji N N, Madu C N, Okafor C C, et al. A Geo-Hazard Risk Assessment Technique for Analyzing Impacts of Surface Subsidence within Onyeama Mine, South East Nigeria[J]. *Land*, 2023, 12(3).
- [159] 曾韬睿, 殷坤龙, 桂蕾, 等. 基于滑坡致灾强度预测的建筑物易损性定量评价[J]. *地球科学*, 2023, 48(5): 1807-1824. (Zeng Taorui, Yin Kunlong, Gui Lei, et al. Quantitative vulnerability analysis of buildings based on landslide intensity prediction[J]. *Earth Science*, 2023, 48(5): 1807-1824. (in Chinese))
- [160] Bouali E H Y, Oommen T, Escobar-Wolf R. Structure Mapping through Spatial and Temporal Deformation Monitoring Using Persistent Scatterer Interferometry and Geographic Information Systems[C]// 3rd Conference on Geotechnical Frontiers. Orlando, FL: Ind Fabr Assoc Int, 2017: 509-519.
- [161] Mohamadi B, Balz T, Younes A. Towards a PS-InSAR Based Prediction Model for Building Collapse: Spatiotemporal Patterns of Vertical Surface Motion in Collapsed Building Areas-Case Study of Alexandria, Egypt[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(20).
- [162] Barra A, Reyes-Carmona C, Herrera G, et al. From satellite interferometry displacements to potential damage maps: A tool for risk reduction and urban planning br[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 282.
- [163] Bassoli E, Vincenzi L, Grassi F, et al. A multi-temporal DInSAR-based method for the assessment of the 3D rigid motion of buildings and corresponding uncertainties[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 73.
- [164] Nappo N, Peduto D, Polcari M, et al. Subsidence in Como historic centre (northern Italy): Assessment of building vulnerability combining hydrogeological and stratigraphic features, Cosmo-SkyMed InSAR and damage data[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2021, 56.
- [165] 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.
- [166] Liu Y, Cao W, Shi Z, et al. Evaluation of Post-Tunneling Aging Buildings Using the InSAR Nonuniform Settlement Index[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(14).
- [167] Arangio S, Calo F, Di Mauro M, et al. An application of the SBAS-DInSAR technique for the assessment of structural damage in the city of Rome[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2014, 10(11): 1469-1483.
- [168] Cerchiello V, Tessari G, Velterop E, et al. Building Damage Risk by Modeling Interferometric Time Series[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(4): 509-513.
- [169] Macchiarulo 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).
- [170] D'aranno P J V, Marsella M, Scifoni S, et al. Advanced DInSAR analysis for building damage assessment in large urban areas: an application to the city of Roma, Italy[C]// Conference on SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XV. Toulouse, France: SPIE, 2015:108-116.
- [171] Lipecki T. Non-Contact Diagnostics of the Geometry of a Historic Wooden Building as an Element of Periodic Safety Assessment[J]. *Sensors*, 2022, 22(4).
- [172] 祝传广, 张继贤, 邓喀中, 等. 多源 SAR 影像监测矿区建筑物三维位移场[J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(4): 701-706+725. (Zhu Chuanguang, Zhang Jixian, Deng Kazhong, et al. Three-dimensional displacement field of buildings detection from multi-source SAR imagery[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(4): 701-706+725. (in Chinese))
- [173] Hsieh C S, Lin D Y. Establish an efficient method to monitor slope deformation using PS-InSAR, MUAV, and surveillance cameras[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2020, 31(6): 663-675.
- [174] Montuori A, Luzi G, Bignami C, et al. The Interferometric Use of Radar Sensors for the Urban Monitoring of Structural Vibrations and Surface Displacements[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(8): 3761-3776.
- [175] He Y, Xu G, Kaufmann H, et al. Integration of InSAR and LiDAR Technologies for a Detailed Urban Subsidence and Hazard Assessment in Shenzhen, China[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(12).
- [176] Obda I, El Kharim Y, Bounab A, et al. Multi-criteria assessment approach of slow-moving urban landslide hazard: the case of Moulay Yacoub, Morocco[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2022, 59(5): 300-317.
- [177] 周艳兵, 施钟淇, 金典琦, 等. 天空地一体化监测技术在既有建筑安全管控中的应用和展望[J]. *建筑结构*, 2022, 52 (S2): 1893-1897. (Zhou Yanbing, Shi Zhongqi, Jin Dianqi, et al. Application and prospect of integrated spaceborne, airborne and terrestrial monitoring technology

- in safety management and control of existing buildings[J]. Building Structure, 2022, 52 (S2): 1893-1897. (in Chinese))
- [178] Wu Z R, Ma P F, Zheng Y, et al. Automatic detection and classification of land subsidence in deltaic metropolitan areas using distributed scatterer InSAR and Oriented R-CNN[J]. Remote Sensing of Environment, 2023, 290: 113545.
- [179] Guo Y, Hu S, Wu W, et al. Multitemporal time series analysis using machine learning models for ground deformation in the Erhai region, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(7).
- [180] 刘奇. 基于 InSAR 的城市房屋潜在风险评估与沉降预测 [D]. 中南大学, 2023: 39-69. (Liu Qi. Potential risk assessment and settlement prediction of urban housing based on InSAR[D]. Central South University, 2023: 39-69. (in Chinese))
- [181] 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>.
- [182] 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>.
- [183] 中国工程建设标准化协会. 建筑安全星载干涉雷达监测技术规程: T/CECS 1165-2022[S]. 北京: 中国计划出版社, 2022. (China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for monitoring of building safety by spaceborne interferometric synthetic aperture radar: T/CECS 1165-2022[S]. Beijing: Beijing China Planning Publishing House, 2022. (in Chinese))

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。

邹少豪 (2000—), 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。

周晓枫 (1998—), 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。