

# 基于星载 InSAR 技术的房屋建筑安全风险 评估指标体系综述

周云<sup>1,2,3</sup>, 邹少豪<sup>3</sup>, 周晓枫<sup>3</sup>, 魏祎<sup>3</sup>, 谈忠坤<sup>4</sup>, 易伟建<sup>1,2,3</sup>

- (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. 湖南大学建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南长沙 410082; 3. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082; 4. 中腾晟维科技(湖南)有限公司, 湖南长沙 410012)

**摘要:**面向我国城市房屋建筑从“建造为主”向“建养并重”直至向“大规模运维”转型发展的时代背景,星载合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术为既有量大面广存量建筑全生命周期运维管养开辟了全新路径。星载 InSAR 技术具有大范围、高精度、可持续及非接触的变形观测优势,然而变形监测并不等同于风险评估。明确建筑变形与结构损伤机理之间的定量关系,对于突破 InSAR 监测数据向结构安全状态转译的壁垒至关重要。为此,综述了常用 InSAR 技术的发展脉络及其在多尺度建筑变形监测的可行性;系统分析了结构领域建筑安全评估指标阈值体系的由来、发展及国内外规范相关规定的异同;归纳总结了星载 InSAR 技术在建筑风险评估中的研究现状,并探讨了该技术与工程检测规范衔接的关键问题。研究表明,星载 InSAR 技术与城市建筑群广域筛查的融合和应用展现出广阔前景,但不同研究在风险评估指标选取和阈值设定上仍存在较大差异,制约了该技术的规模化应用。鉴于此,建立兼具可复用性和可操作性的统一建筑风险评估指标阈值体系,对于未来构建城市房屋建筑常态化、智能化体检机制具有重要意义。

**关键词:**房屋建筑; InSAR 技术; 建筑变形; 风险评估; 指标阈值; 综述

**中图分类号:**TU18 **文献标志码:**A

## Review of indicator systems for building safety risks assessment using spaceborne InSAR technology

ZHOU Yun<sup>1,2,3</sup>, ZOU Shaohao<sup>3</sup>, ZHOU Xiaofeng<sup>3</sup>, WEI Yi<sup>3</sup>, TAN Zhongkun<sup>4</sup>, YI Weijian<sup>1,2,3</sup>

- (1. Hunan Provincial Key Laboratory for Damage Diagnosis of Engineering Structure, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 4. Zhongteng Shengwei (Hunan) Co., Ltd, Changsha 410012, China)

**Abstract:** Against the backdrop of the transition in China's urban building sector from a "construction-focused" approach to "equal emphasis on construction and maintenance", and further toward "large-scale operation and maintenance", spaceborne interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology has opened a new pathway for the full-lifecycle maintenance and management of the vast existing building stock. Spaceborne InSAR offers advantages such as large-scale, high-precision, sustainable, and non-contact deformation monitoring. However, accurately assessing structural safety conditions based on deformation data remains crucial. To reveal the relationship between building deformation and structural damage mechanisms, existing building safety assessment indicators and threshold systems have been systematically reviewed. Key achievements include: summarizing the evolution of commonly used InSAR technologies and their feasibility in multi-scale building deformation monitoring; systematically analyzing the origins and development of threshold systems for building safety assessment in structural engineering, as well as differences in relevant international and domestic codes; and synthesizing the current state of research on spaceborne InSAR in building risk assessment, while discussing key issues in aligning the technology with engineering inspection and monitoring standards. Research shows that the integration and application of spaceborne InSAR in large-scale wide-area urban building screening hold broad prospects. However, significant

基金项目:国家自然科学基金项目(52278306),湖南省应急管理厅应急管理科技项目(ytkjxm\_202406)。

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。email:zhouyun05@hnu.edu.cn

通信作者:邹少豪,出生于2000年,男,硕士研究生,主要从事结构健康监测研究。email:zoushaohao@hnu.edu.cn

收稿日期:2025年4月

variations in the selection of risk assessment indicators and threshold settings across studies hinder its widespread adoption. In light of this, establishing a unified, reusable, and operable threshold system for building risk assessment is of great importance for developing regular and intelligent inspection mechanisms for urban buildings in the future.

**Keywords:** building structure; InSAR technology; building deformation; risk assessment; indicator-threshold; review

## 0 引言

居安方能思危,屋固始可邦宁。城市房屋安全是国家治理体系现代化进程中关乎国计民生的重大议题。改革开放以来,中国完成了人类历史上规模最大、速度最快的城镇化跨越,城镇化率从1978年的17.92%跃升至2023年的66.16%<sup>[1]</sup>。截至2020年底,全国存量城乡房屋建筑及市政设施超6亿栋,扣除农村辅助用房、在建工程以及不属于房屋建筑的杂项后,仍有城乡房屋建筑3.54亿栋,总建筑面积达1280亿平方米<sup>[2]</sup>。随着早期建设的房屋逐渐老化,而新增房屋的速度相对放缓,导致老旧房屋在存量房屋中的占比不断攀升。截至2022年年底,我国既有房屋中建成年份超过30年的接近20%,预计到2040年,将有近80%的房屋进入设计使用年限的中后期,成为“老小区”<sup>[3]</sup>。此外,庞大房屋建筑总量下自建房占比居高,由于设计和施工不规范,建筑结构初始缺陷较多。房屋质量“先天不足”,加之受建筑长期服役下结构性劣化以及各类人为和环境因素扰动耦合作用,房屋倒塌事故屡屡发生,城市房屋安全管控形势日益严峻。

面对该现状,国家相关部门相继出台多项政策文件,全面部署房屋安全隐患排查和专项整治行动以保障城市安全和韧性<sup>[4-5]</sup>。目前,城市更新行动是我国为应对城市发展转型期结构性矛盾的关键战略部署,制度要求严格以建筑及市政设施安全为根本遵循,坚持“先体检后更新,无体检不更新”工作准则,一体化推进城市体检和城市更新<sup>[6-7]</sup>。围绕城市公共安全建设重大战略需求,岳清瑞等<sup>[8]</sup>从城市安全问题所涉及的三大基本要素出发,提出了以“风险源-承灾体-减灾力”为核心的城市安全理论架构,构建了城市安全管理的新路径。城市建筑群作为城市核心“承灾体”,其安全管控运维体系水平直接决定城市“减灾力”的韧性基底。

对于房屋建筑安全评估与风险排查,建筑结构变形监测至关重要,建筑的变形特征不仅是荷载作用下的表现响应,更是反映结构内部力学行为与性能状态的重要指征,是评估潜在损伤与失效风险的关键依据。目前,传统与新兴建筑变形监测技术日趋成熟,包括大地测量(全站仪、水准仪)、光学

测量(近景摄影测量、激光点云扫描)、接触传感测量(振弦式传感器、光纤光栅阵列)以及空间对地测量(GPS、北斗/GNSS)等,尽管上述方法在单体建筑监测上取得良好的应用成效,然而面对既有的庞大建筑体量,存在布设密度受限、运维成本高昂及响应延迟等系统性缺陷,难以满足城市广域建筑群大范围、常态化风险监测预警需求,亟需寻找一种兼具高效率与成本效益的新型监测方法。

作为当代遥感技术的前沿应用,星载合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术以其全天候、全天时作业的能力,覆盖范围广,测量精度高,无需事先布设传感器,且可追溯历史变形等显著优势,弥补了传统离散点状、接触式监测方法的不足,为广域城市建筑变形监测提供了全新方案。在全球各国的高度支持和广泛的工程实际需求持续推动下,合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)卫星系统及InSAR技术在过去数十年里取得了长足进步。图1总结了三种常用波段相关SAR卫星及系列InSAR技术提出年份信息。目前,星载InSAR技术已广泛应用于自然灾害评估<sup>[9-10]</sup>、农林资源管理<sup>[11-12]</sup>、城市建筑和基础设施监测<sup>[13-16]</sup>等多个领域。在建筑安全评估领域,星载InSAR技术通过探测毫米级精度的建筑及周边环境变形信号,并以具有三维空间信息的时序监测点形式与建筑结构要素对应相关联,可为建筑在受各类自然或人为扰动作用下的潜在风险识别、早期预警与长期稳定性评估提供可靠时空数据支持,实现城市房屋建筑安全管控从注重被动灾后救助向主动灾前预防转变。随着新一代SAR卫星系统性能的提升、InSAR处理算法的持续精进以及遥感监测技术与结构工程理论的深度融合,基于星载InSAR技术的建筑风险监测评估范式正逐步从“大范围趋势分析普查”向“精细化单体结构诊断”演进。

星载InSAR技术在广域建筑群变形监测方面展现出独特优势,但其以变形观测为主而非直接评估建筑安全状态的技术局限性,以及建筑变形与结构损伤的定量关联机制的不确定性,仍是该技术在建筑安全评估领域推广运用的关键瓶颈。当前,现有基于InSAR技术的房屋风险识别评估研究,在变形指标选取、参数体系构建及阈值设定上存在较

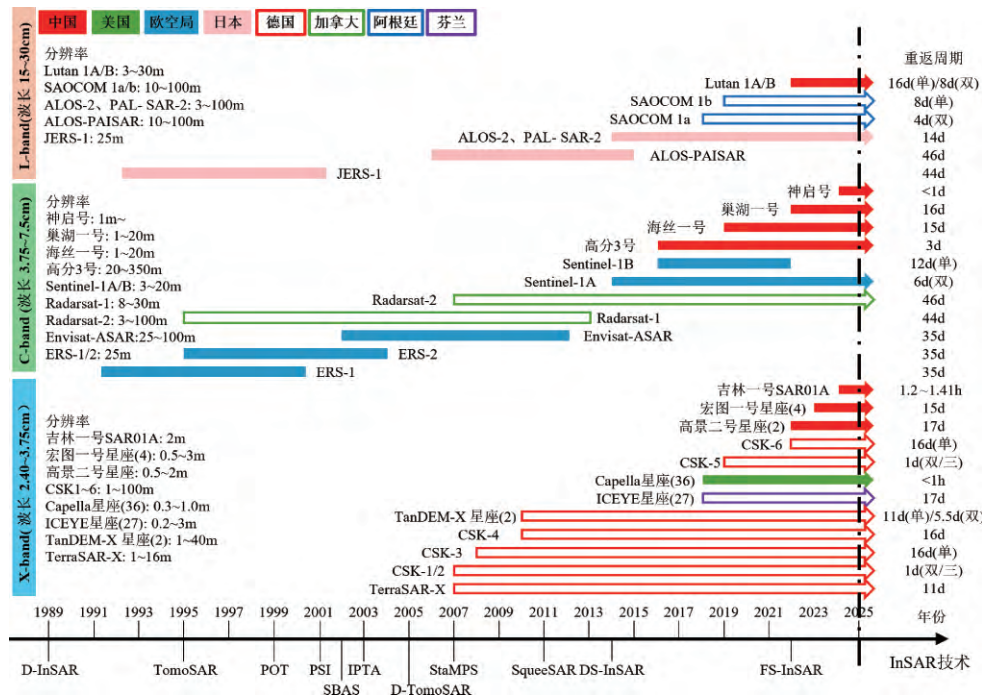


图1 系列SAR卫星与InSAR技术提出年份

Fig. 1 Year of proposal for series of SAR satellites and InSAR technologies

大差异,整体呈现出繁杂缺乏系统性的问题。为此,本文中系统梳理并充分挖掘适用于星载 InSAR 技术观测特性的建筑风险评估变形指标体系及相应阈值,为基于 InSAR 数据驱动的建筑安全评估提供理论支持,推动该领域研究的规范化及实用化落地,并助力未来数字化、智能化房屋体检机制实现。

## 1 星载 InSAR 技术发展

InSAR 技术是基于合成孔径雷达技术与干涉测量技术发展起来的一种空间对地观测技术<sup>[17]</sup>。其中,SAR的概念始于20世纪50年代,是一种通过发射微波脉冲并接收反射信号,进而记录待测地面分辨率单元的幅值和相位信息的主动式微波遥感测量方法。干涉测量技术基于1801年的杨氏双缝干涉试验原理,通过对同一区域在不同时间点的两幅SAR影像进行复共轭相乘提取同一目标对应的两个回波信号间的相位差,并结合轨道数据与成像几何模型获取目标三维空间位置及变形信息,如图2所示。鉴于已形成较为完备的InSAR技术体系研究成果,对部分主流InSAR技术的历史发展脉络及相关技术原理进行梳理介绍,同时对比不同技术之间差异,如表1所示。

InSAR技术的概念最初于20世纪60年代末提出,并主要应用于如金星、月球和地球的地形测绘和 高程数据的获取<sup>[18-19]</sup>。20世纪90年代初,差

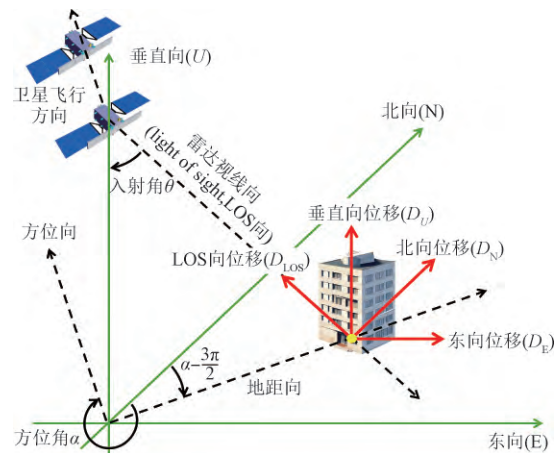


图2 InSAR变形观测示意

Fig. 2 InSAR deformation monitoring schematic diagram

分InSAR(differential InSAR, D-InSAR)技术<sup>[20-21]</sup>的出现,标志着其进入变形观测领域,其通过引入外部数字高程模型(digital elevation model, DEM)或三轨、四轨差分去除地形相位实现了厘米级变形测量,但监测精度易受大气延迟误差、时空去相干、轨道误差及噪声等因素影响。为克服这些问题,20世纪90年代末,时间序列InSAR(time series InSAR, TS-InSAR)技术应运而生,其本质在于通过多时相SAR影像的干涉叠加,利用多个干涉对的冗余观测以补偿上述系统性误差,从而更准确地提取地物目标变形信息的时间序列<sup>[22]</sup>。随后,逐步由早期对差分干涉图简单加权叠加的堆叠InSAR(InSAR-stacking)技术<sup>[23]</sup>发展出其他精细化

表 1 常用 InSAR 技术简介与对比

Table 1 Introduction and comparison of common InSAR techniques

技术类别	技术核心	优势	缺陷	适用性
D-InSAR	对形变前后两幅影像进行干涉和差分获取变形信息	大范围、高精度	监测精度易受大气延迟及时空失相干影响	大尺度突发性变形测量,如地震、滑坡
InSAR-Stacking	对多幅解缠的差分干涉图进行加权叠加以提高信噪比	可获取变形速率	无法获取变形时间序列,变形非线性特征建模能力弱	大范围地表长期连续监测场景,如矿区
PS-InSAR	选择稳定反射特性和高信噪比 PS 点提高解缠精度	时间连续性,可获取时序变形数据	影像数量要求高,非城区监测点密度不足,空间连续性差	城市环境和有稳定人造结构地区
SBAS-InSAR	选择小时空基线子集的差分干涉图抑制去相干现象	空间连续性,可提取非线性变形	对基线选择敏感,不适用于长周期连续监测	大范围和复杂变形模式的地表形变监测
D-TomoSAR	利用细微基线差异影像对同一目标多次观测解决叠掩现象	方位-距离-高度-时间四维成像	影像数量要求高,基线分布不均会引入传播误差	复杂城市环境和高层建筑密集区域
DS-InSAR	同质像元提取及时序 DS 相位优化	大幅提高监测点密度	分布式目标相位稳定性较差,大数据集计算量大	非人工低相干区域及精密监测需求高场景

方法,具有代表性的包括单主影像的永久散射体方法 (persistent scatterer InSAR, PS-InSAR)<sup>[24]</sup> 和多主影像的小基线集方法 (small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR)<sup>[25]</sup>。其中,PS-InSAR 技术通过统计分析方法选取在时间上散射特性相对稳定、回波信号相对较强的永久散射体 (persistent scatterer, PS) 作为观测目标,可有效抑制大气延迟和时间失相干的影响。SBAS-InSAR 技术则通过设定时间空间基线阈值,选取具有较短时空基线的干涉对进行时序分析,从而减小了大气延迟和时空失相干。另外,根据数据处理时所选目标散射特性差异,与 PS-InSAR 技术相对应的还有分布式散射体方法 (distributed scatterer InSAR, DS-InSAR)<sup>[26]</sup>。分布式散射体 (distributed scatterer, DS) 由多个相邻像素的散射贡献形成,其单像素相位可能不稳定,但在统计意义上表现出一定的时空一致性。DS-InSAR 技术核心在于,采用同质样本提取算法准确识别同质点,再根据同质点的统计特性进行时序 DS 相位优化,降低噪声影响,最终将优化后的 DS 目标与 PS 目标一起融入传统 PS-InSAR 数据处理框架,从而获取高精度、高空间分辨率的时序形变数据,可弥补 PS-InSAR 技术在低相干区域监测点密度不足的缺陷。

此外,传统 SAR 成像为三维场景在方位向-距离向 (同雷达视线向, light of sight, LOS 向) 二维平面内的投影,多个斜距相同而高度不同的观测目标散射信号将被压缩到同一分辨单元内,因而无法获取目标高程信息,在城市高层建筑密集区域还易出现叠掩现象<sup>[27]</sup>,为此,层析 SAR (tomographic synthetic aperture radar, TomoSAR) 技术<sup>[28]</sup>通过将合成孔径原理延伸至高程向,实现了叠掩散射体的分离及三维结构重建,由此发展而来的差分层析 SAR (differential TomoSAR, D-

TomoSAR) 技术<sup>[29]</sup>则基于目标线性变形假设,可进一步反演目标时间维变形信息。为适应建筑复杂变形模式,更多维的时序成像模型被陆续提出,充分展现了 TomoSAR 技术在城市多维动态监测应用中的发展潜力<sup>[30-31]</sup>。

## 2 建筑变形与沉降问题概述

### 2.1 星载 InSAR 监测建筑变形的可行性

在建筑物服役过程中,由于受直接作用 (即荷载,如结构自重、使用荷载、风荷载等) 与间接作用 (如温度变化、地基沉降、地下水变动、地震作用、周边施工扰动等) 的共同影响,必然导致其产生沉降、倾斜、水平位移、挠度、裂缝扩展等几何形态和空间位置的变化,统称为建筑变形<sup>[32]</sup>。有限范围内的建筑变形属于结构的正常响应,但若变形超出设计允许限值,将会导致建筑服役性能衰退、使用寿命折减甚至直接灾变失稳。在建筑安全风险评估与监测实践中,精确掌握建筑物的时空变形特征至关重要。

图 3 展示了一般房屋建筑组成要素、传力路径以及 InSAR 技术观测下 PS 点分布示意。作为一种

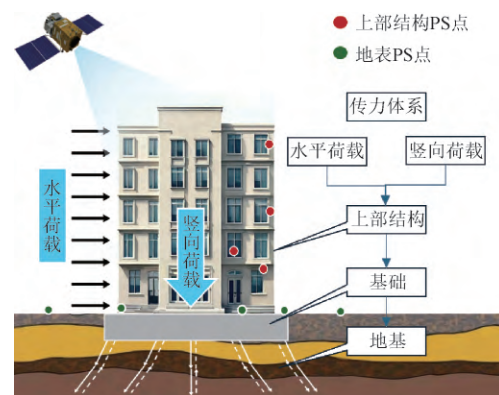


图 3 房屋建筑传力体系

Fig. 3 Load transfer system in building structures

主动式的建筑风险筛查工具,星载 InSAR 技术建筑变形观测具有以下特点:

1) 关注外观变形。InSAR 技术通过捕捉建筑表面散射信号进行变形识别,利用时序 InSAR 技术开展建筑结构变形监测已然具备优于 5 mm 的精度且至少可达到 JGJ 8—2016《建筑变形测量规范》中规定的三级精度标准<sup>[33-34]</sup>。但由于房屋建筑通常为封闭式结构,其探测范围局限于建筑表面结构或外观整体变形,难以识别内部结构的变形和状态特征。此外,现有星载 SAR 系统米级空间分辨率无法有效捕捉如裂缝或小尺度表现损伤。

2) 长周期持续采样。InSAR 技术凭借其主动微波遥感的特性,不受光照和天气限制,可实现全天时、全天候观测。同时,卫星自发射后即以固定轨道和稳定重访周期(如 Sentinel-1 卫星为 12 d)对目标区域进行周期性持续采样,积累了大量历史存档数据,支持建筑过往数十年变形趋势的回溯分析,有效解决了传统监测方式历史基线数据缺失的问题。然而,受限于 SAR 卫星固定重访周期(通常为数天至数十天),导致其时间采样频率不足以捕捉风振等短周期动态响应或施工扰动引起的快速变形,而更适合于建筑长期缓慢变形监测与渐变损伤评估。

3) 注重方向特征。SAR 卫星侧视成像机制赋予其大范围捕获地表特征的优势,单次过境成像可覆盖数百甚至数千平方公里区域(如 Sentinel-1 卫星宽幅成像模式可覆盖宽约 250 km 的地表条带)。但其较小入射角使得 InSAR 技术对垂直方向变形敏感度高,对水平方向(特别是南北向)敏感度较低,因此特别适用于大范围建筑沉降观测<sup>[35-36]</sup>。而沉降作为影响建筑物结构安全、使用寿命和功能性的关键因素,是所有建筑物在施工阶段及使用阶段必须进行的观测项目。

4) 瞬时成像。SAR 卫星成像近乎瞬间完成,卫星重访过境时,不同时间节点下建筑所在场地温度、风速等环境荷载存在差异,使得 InSAR 技术观测的变形结果包含此类荷载作用下的建筑瞬态结构响应。虽然风振变形和日照温度变形在小体型房屋建筑中表现不明显,但对于高层建筑和大跨空间结构,这两类变形相较于其他变形(如地基沉降)通常更为显著。特别是,在高层、低层及大跨空间结构建筑交错分布的城市区域,高层建筑顶部更突出的竖向温度变形与水平向风振变形以及大跨空间结构水平向温度变形会掩盖低层建筑或地表异常变形趋势,进而导致异常风险识别困难及评估结果可靠性降低,在实际应用中需针对上述干扰性变形采取相应的控制与补偿措施。对于温

度变形,一方面,可利用其在时间上的周期性波动特征,采用时域分析方法予以剔除<sup>[37]</sup>;另一方面,基于包含温度相位的拓展 InSAR 干涉相位变形反演模型,直接输入建筑材料热膨胀系数与温度数据分离建筑温度变形与线性变形<sup>[30,38]</sup>。而对于风振变形此类高频位移,尽管微小风致振动可在长时间序列平均和滤波过程中得到抑制,但某些高层、超高层建筑水平位移峰值可达厘米甚至分米级,受 SAR 卫星时间分辨率及水平向变形灵敏度共同限制,目前仍难以有效解析此分量。为此,部分学者通过设置高度阈值直接剔除高层顶端 PS 点仅保留近地面测点以规避风险误判<sup>[39]</sup>,而更精细化的风振分析则需引入高频变形监测技术如地基 SAR (ground based SAR, GB-SAR) 予以补充监测<sup>[40]</sup>。

## 2.2 建筑沉降变形机理

建筑沉降的主要来源是地基土在外荷载作用下产生的附加应力诱使土体压缩变形<sup>[41]</sup>。基础搁置于地基上,二者变形必然是协调的。然而,从岩土工程的角度,由于地基土存在回弹再压缩现象,地基的实际变形往往略小于基础沉降量。作为连接建筑上部结构与地基的媒介,基础的变形行为直接影响上部结构的内力状态,因此,结构工程中更加关注基础最终沉降量<sup>[42]</sup>。

建筑沉降通常被分为均匀沉降、整体倾斜及差异沉降三种类型,如图 4 所示。尽管建筑不同类型沉降的诱发因素有多个方面,且不同作用将导致建筑沉降变形特征的显著差异,如表 2 所示,但其本质仍在于对地基土应力状态或土壤性质的改变。均匀沉降作为一种相对安全的沉降模式,此情况下,建筑保有原本承载体系,不会产生附加应力或应力集中,但沉降量过大会影响建筑的使用性能。对于刚度较大的中低层建筑,其在差异沉降作用下呈现整体“刚体”倾斜,通常主要影响建筑视觉效果及建筑内相关设备的正常使用,而对于高层刚性建筑,倾斜会在重力作用下引起较大的附加应力和位移,亦或与水平荷载作用相耦合

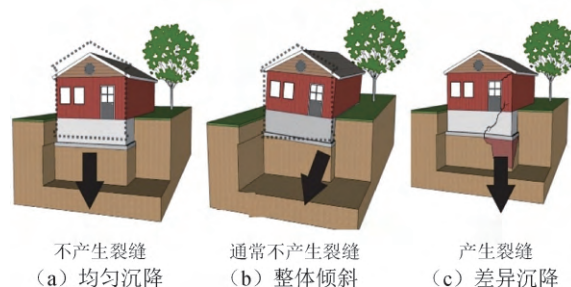


图 4 建筑沉降示意

Fig. 4 Illustration of building settlement

表2 建筑不同沉降行为的影响因素与特征

Table 2 Factors and characteristics influencing different settlement behaviors of buildings

分类	影响因素	作用机理	沉降行为	变形特征
内部因素	建筑自重	附加应力下土体瞬时变形及长期主固结和蠕变	均匀沉降	与建筑自重正相关,长期存在
	结构形态	建筑体型、刚度突变等导致荷载分布梯度差	差异沉降	随时间推移而趋于稳定
	施工偏差	材料、工艺等导致实际与设计荷载分布不符	差异沉降	随建筑高度增加而逐渐放大
外部因素	地质条件	地质结构和土壤物理特性直接影响沉降行为	均匀、差异沉降	建筑跨越非同质土层时将发生差异沉降
	气候变化	冻融循环影响土壤的密度和结构	均匀、差异沉降	季节性波动变形
	地下水位波动	水位变化导致土体有效应力改变	均匀、差异沉降	与水位变化正相关,存在滞后性
	邻近工程扰动	基坑开挖引发周围土体应力重分布	差异沉降	瞬时变形突增
	地震导致液化	地基土部分或完全丧失抗剪强度	均匀、差异沉降	触发条件敏感,多发生于饱和松散砂土地基

导致重力二阶效应放大,严重时会造成建筑倾覆倒塌。差异沉降是导致建筑结构安全性和使用功能降低的关键因素。其本质在于,基础发生差异位移时,迫使建筑上部结构产生与之相协调的强制被动变形,并作为“位移荷载”在建筑超静定体系内部引发额外的、超出设计预期的附加内力与变形。当附加效应超过结构或构件的承载力极限或正常使用极限时,将引发裂缝扩展、结构渐进性损伤累积甚至整体失稳破坏。此外,差异沉降还会影响建筑的整体稳定性,降低抗震性能,增加地震灾害风险<sup>[43-44]</sup>。

沉降变形诱发的建筑安全问题是工程领域长期关注的焦点,众多学者围绕建筑沉降诱发机制及治理对策<sup>[45-46]</sup>、超量沉降控制防范<sup>[47-48]</sup>、沉降预测<sup>[49-51]</sup>以及上部结构在不同沉降模式下的响应<sup>[52-54]</sup>等方面,进行了系统深入的探讨与阐述。

### 2.3 地表变形

各种人为和自然因素会诱发不同范围和剧烈程度的地表变形,进而造成上部建筑物受损。然而,不论何种诱发机制,特定建筑对地表变形引发的建筑变形承受能力属于既定的客观事实。尽管地表变形与建筑变形存在一定关联,但同时又有本质区别。因此,建筑损伤评估应集中于建筑自身变形状态,而非地表变形。

#### 2.3.1 区域级尺度

对于地下矿藏开采、城市管隧施工、城市内基坑开挖、城市填土雨水浸润等导致的地表变形,尽管在诱发机理、影响范围等方面存在一定差异,但在诱发的沉降形式上具有相似性,表现为区域性的“沉降槽”“沉降盆”或“沉降漏斗”,且可使用相应的预测模型对沉降剖面曲线进行定量描述。此类地表变形包括垂直和水平变形两个分量,基于这两个分量又可导出倾斜、曲率、水平变形、扭曲和剪应变等变形参数<sup>[55]</sup>。由于形变范围较大,故建筑损伤评估流程通常为,基于有限的地表形变实测数据认识地表移动规律,在此基础上确定预

测参数并选择合适的地表变形预测模型构建地表变形场,最终提取关键变形参数结合规范限值或经验损伤关系对建筑损伤风险进行研判<sup>[56]</sup>。上述评估方法的准确性取决于两个关键因素:

1) 对地表变形及建筑变形的准确预测。以隧道开挖引起的地表变形预测为例,目前普遍使用的预测模型为Peck经验公式<sup>[57]</sup>,但其获取的为不考虑上部建筑物或其他结构物影响情况下的天然地表变形。事实上,由于土-结构相互作用(soil structure interaction, SSI)的存在,即建筑主体结构及其下覆地基土体作为一个变形相互协调与力学响应(包括静力和动力响应)双向耦合的整体,二者在内力、变形等方面存在相互影响和相互制约的现象。而Peck公式因未考虑建筑刚度对土体变形的约束作用,会造成对地表变形量的高估。另外,地表变形量与建筑物实际变形量并不一致,尽管已有研究表明地表变形与建筑变形存在一定的同步性,但由于建筑自身特征及土壤性质的差异,建筑变形与地表变形间存在着复杂的相对变形关系<sup>[58-59]</sup>。针对以上问题,有学者通过考虑土体与建筑的相对刚度对地表形变预测模型进行了修正<sup>[60]</sup>或提出了相关的分析模型用于计算地表变形引起的建筑变形<sup>[61]</sup>,虽然在一定程度上考虑了建筑物与地基土之间的制约关系并提高了相应的变形预测精度,但面向更复杂精细的SSI效应所导致地表-建筑变形关系问题仍有待进一步研究。而InSAR技术直接观测由于矿藏开采<sup>[62]</sup>及地下管隧施工<sup>[63]</sup>诱发的地表变形,进而提取相关变形参数,可有效提高建筑物损伤评估结果的可靠性。

2) 评估指标选取、变形阈值设定及其相应损伤等级划分的科学性。针对地下煤矿开采诱发的地表变形的建筑损伤评估,我国特别制定了相应的规程<sup>[64]</sup>(简称“三下”规范),采用倾斜、曲率和水平变形3个地表变形值作为划分建筑物损坏等级的依据。“三下”规程以地表变形值硬性划分建筑损伤等级,未能充分考虑不同建筑的变形抵抗能力差

异,存在一定的局限性。崔希民等<sup>[56,65]</sup>对国内外由于矿藏开采活动诱发地表变形导致的建筑物损伤评估方法进行了系统梳理对比,并在继承“三下”规范以地表形变为核心指标的基础上,构建了综合考虑建筑物长度这一结构变形抵抗能力影响因素的建筑损害评价分类体系,完善了该规程在考虑结构自身属性方面的不足,同时体现了建筑损害评价需从变形阈值判定向结构响应分析转变。

### 2.3.2 城市级尺度

城市地下水超采和工程建设活动将导致不同程度的城市级地表沉降,作为不可逆的环境和资源损失,其已成为国内外广泛关注的一项地质灾害。在全球48个人口最多的沿海城市中,几乎所有城市的下沉速度都超过了海平面的上升速度<sup>[66]</sup>。例如,Ao等<sup>[67]</sup>采用InSAR技术对中国82座城市进行了形变监测,研究表明,中国有近一半的主要城市每年地表沉降速度超过3 mm,而主要原因是地下水超采以及城市上部庞大的建筑体量。地表沉降将衍生各种次生灾害,且对城市本身及其上部建筑物与基础设施造成的重大危害不易被察觉,亟需可靠手段实现有效的预防管理。

尽管InSAR技术为此提供了有力工具,但仍面临着重大挑战,即InSAR全形变场的分离。城市级尺度的地表快速下沉产生的长空间波长、大幅度形变信号将掩盖相对较短空间波长、较小幅度的建筑变形,从而对建筑风险评估造成干扰。为此,Solano等<sup>[68]</sup>率先提出了一种空间频域带通滤波方法,用于分离不同空间波长形变信号,并应用于全球沉降速率最快的墨西哥城,提取了由于地下水抽取导致的城市尺度大幅度沉降所掩盖的城市建筑与基础设施真实变形,如图5所示。

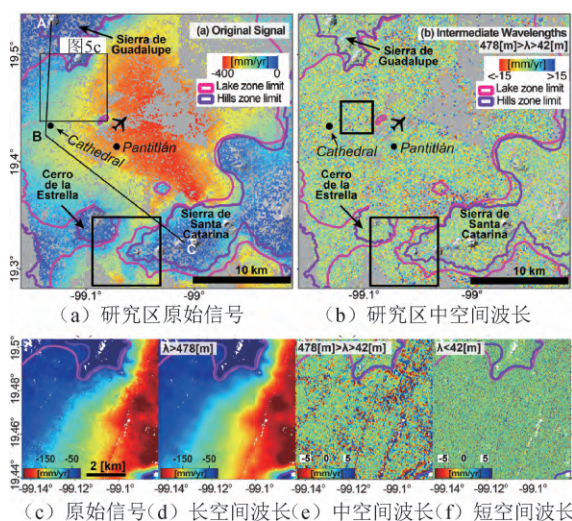


图5 不同空间波长形变信号<sup>[68]</sup>  
Fig. 5 Deformation signals with different spatial wavelengths<sup>[68]</sup>

Wang等<sup>[69]</sup>同样采用谱分析方法对国内沉降较为严重的上海市进行了多尺度形变分析,深度解译了不同形变信号的诱发机制。由此可见,开展InSAR全形变场分离可提升建筑变形监测的精细化程度,并为结构损伤的物理机制解析提供关键数据支撑。一方面,从多个尺度识别沉降的来源和本质,有效提高了建筑变形机制解译可靠性;另一方面,分离了由于大范围地表运动引起的建筑刚体位移影响,直接提取建筑真实变形,这对于状态评估至关重要。

### 2.3.3 板块级尺度

大陆漂移的驱动力(如地幔对流)持续推动地球岩石圈板块或块体间发生缓慢、长期的相对运动(碰撞、挤压与张拉),塑造了地球表面的地质特征,并在板块边界处形成了全球主要地震带<sup>[70]</sup>。地震是断层面上长期积累的弹性应变能突发释放的结果,引起强烈地面振动的同时伴随着地面裂缝和变形,其本身属于一种自然现象,而引发灾害的本体为建筑。

在土木工程领域,建筑的震害评估主要集中于基于地震动力学的单体建筑结构响应分析,尽管也有学者致力于基于简化代理模型的城市建筑群动力响应分析与损伤预测<sup>[71-72]</sup>,但很少有学者关注地表同震变形量与建筑物毁损程度之间的关系。相关研究表明,建筑毁损率及毁损程度与地震导致的地表变形梯度呈明显正相关<sup>[73-74]</sup>。在基于SAR数据的建筑震害评估中,由于缺乏结构理论支持,则多聚焦于利用地震前后SAR影像及其干涉产品开展“像素”或“目标”级震前-同震强度和相干性等参数变化检测以定性识别毁损建筑<sup>[75]</sup>,亦仅有少量研究关注同震变形量与建筑毁损程度的关系。例如:Li等<sup>[76]</sup>构建了以结构类型分类的建筑损伤-同震变形数学回归关系,研究表明,不同结构类型建筑损伤程度与同震变形量间存在函数形式差异,但整体呈显著正相关趋势。Du等<sup>[77]</sup>则认为建筑倒塌趋势与地震时的板块移动方向一致,由此将LOS向同震变形分解为地震方向变形,并依据变形大小划分建筑震损等级。

综上,建筑物震害评估仍存在着以下不足:一方面在于,现有研究对同震形变量这一关键数据的利用尚不充分;另一方面在于,InSAR技术获取的同震变形场亦同时包含地震时的板块运动和建筑物自身变形等多个形变信号,且显然前者量级远大于后者,严重干扰了对建筑真实损伤状态的判断。因此,实现混合形变信号的分离以提取建

筑结构的真实变形信息,可更准确表征建筑震损程度,进一步提高评估结果可靠性。

### 3 建筑风险评估指标及阈值分析

#### 3.1 建筑变形损伤关系研究

关于建筑允许变形问题的研究历史悠久,分析方法亦呈多维递进式发展态势,经历了从经验积累、理论推演、数值仿真和物理模型试验的演化推进过程。考虑到相关的变形指标与分析方法存在一定的耦合性,在此以分析方法为主线展开论述,并总结了图6及表3所示的相关指标。

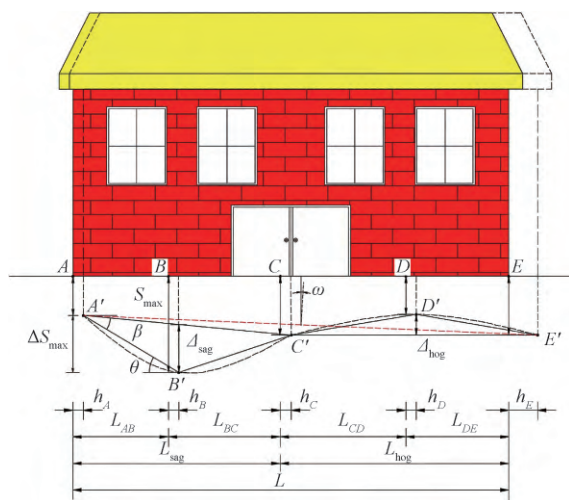


图6 建筑变形指标示意

Fig. 6 Illustration of building deformation indicators

表3 变形指标定义

Table 3 Definition of deformation indicators

指标名称	符号	定义
累计沉降	$S_i$	指定点的累计沉降量
水平位移	$h_i$	指定点的水平位移量
沉降差	$\Delta S$	相邻两点累计沉降的差值
拉应变	$\varepsilon$	两点的水平位移差与两点间距离的比值
坡度	$\theta$	两点沉降差与两点间距离之比
角扭曲	$\beta$	连接两点的直线相对于倾斜直线的转角
倾斜	$\omega$	建筑的整体刚体倾斜
相对挠度	$\Delta$	凹陷( $\Delta_{sag}$ )或凸起( $\Delta_{hog}$ )部分的最大挠度
挠度比	$\Delta/L$	凹陷或凸起部分最大挠度与该部分长度之比

##### 3.1.1 经验分析方法

早期的研究一般采用实证经验分析方法,即通过对大量监测实例进行观察并归纳统计分析,建立变形参数与相应损伤等级之间的数学经验模型,且集中于建筑自重作用下以竖向沉降变形累计导致结构破坏为主的变形损伤关系研究,相对应的指标亦多为建筑的宏观变形参数。

对于建筑的最大沉降,表4汇总了部分学者给出的相关限值建议。可见,由于地基土压缩性、建筑基础类型及上部结构等方面的不同,相应的最大沉降量建议值差异较大。事实上,尽管Meyerhof<sup>[78]</sup>提出建筑最大沉降量限值建议,但其最终强调的是为避免因基础相对变形过大而导致的建筑损坏。Terzaghi<sup>[84]</sup>通过对几座欧洲建筑的观测分析发现,一般建筑可在20 mm的沉降差下而不发生开裂,该指标亦被纳入美国及欧洲等相关标准规范<sup>[85-86]</sup>,并在各地区广为使用。后续, Terzaghi等<sup>[81]</sup>研究又发现,砂土地基下建筑差异沉降一般为总沉降75%,因此,给出了25 mm的最大沉降限制。可见,对总沉降的限制其本质仍为对差异沉降的控制。

表4 最大沉降量相关建议值

Table 4 Limiting values for maximum settlement

年份	研究者	相关建议
1947	Meyerhof <sup>[78]</sup>	框架结构,可承受25~50 mm,损伤75 mm
1956	Skempton等 <sup>[79]</sup>	黏土,独立基础75 mm;筏板基础75~125 mm 砂土,独立基础50 mm;筏板基础50~75 mm
1962	Sowers <sup>[80]</sup>	承重墙结构25~50 mm;框架结构50~100 mm
1967	Terzaghi等 <sup>[81]</sup>	砂土,一般建筑25 mm;筏板基础50 mm
2002	Poulos等 <sup>[82]</sup>	黏土75~135 mm;砂土50~75 mm
2014	Coduto <sup>[83]</sup>	一般建筑12~50 mm;工业建筑25~75 mm

为了更好地描述差异沉降导致的建筑相对变形,Skempton等<sup>[79]</sup>定义了角扭曲(angular distortion)并基于对98座建筑物(主要是框架结构)的研究发现,当角扭曲大于1/300时建筑出现建筑性损伤,角扭曲超过1/150时会发生结构性破坏,并建议建筑应避免出现大于1/500的角扭曲以防止开裂。考虑到不同结构的变形模式差异,框架结构中梁柱为主要承重构件,差异沉降导致相邻柱间产生相对位移,其上部结构承受较大的附加剪力,破坏模式以剪切效应主导;而对于砌体承重结构,其整体沉降趋势常表现为“盆式”下沉(类似于均布荷载作用下简支梁挠度曲线),损伤主要受弯曲变形产生的张拉应力控制。为此,Polshin等<sup>[87]</sup>定义了坡度与挠度比,分别以描述框架结构和砌体结构建筑在差异沉降下可能发生的剪切破坏与弯曲破坏。相较于坡度,角扭曲指标计算时剔除了建筑的刚体倾斜影响,因而更能体现建筑在差异沉降作用下受到的局部剪切效应,而挠度比则通过描述建筑的相对弯曲程度反映建筑的受拉效应。

在此基础上,有学者针对建筑沉降与损伤关系开展了大量工作,但由于建筑沉降允许值的界定受多方面因素影响,难以在同一指标体系中完

全囊括,导致不同研究所给出的相应评估指标阈值间存在差异。综合来看,建筑沉降允许值的界定主要受以下三方面因素影响:

1) 建筑自身变形承受能力。建筑变形承受能力受建筑体型、结构类型以及基础类型等因素影响各有差异。在 Polshin 等<sup>[87]</sup>的研究中发现,长高比大的建筑其整体刚度较小,相应的变形承受能力相对较弱,并给出了允许挠度比与建筑长高比间的关系。根据 Sowers<sup>[80]</sup>提供的建筑总沉降、倾斜及沉降差的相关建议值,可以看出,对于采用柔性上部结构(如钢框架)或刚性基础(如筏板基础)的建筑,其抗变形承受能力较强,能够承受更大的总沉降值和沉降差。Ang 等<sup>[88]</sup>的研究亦发现,相比于框架结构,剪力墙结构对差异沉降更敏感,并给出了相应的角扭曲和差异沉降量建议值。

2) 建筑的沉降特征。对于沉降速率对建筑损坏程度的影响,已有研究<sup>[89]</sup>表明,缓慢沉降的建筑物能承受略高的差异沉降,但仅在极快或极慢时才影响明显。事实上,缓慢发展的沉降可能被结构材料的蠕变或松弛作用所吸收,从而减少损害的易发性。而根据 Burland 等<sup>[90]</sup>的分析,由于土层对建筑变形的约束作用,建筑凸起沉降时中性轴将位于结构底部,凹陷沉降时中性轴位于结构中部,故建筑在凸起情况下更容易受到损害。由 Meyerhof<sup>[91]</sup>总结不同结构类型不同极限状态下的角扭曲限值建议亦可发现,无筋承重墙上凸的限值是下陷的 1/2。

3) 建筑用途。通常,差异沉降导致的结构安全问题较少,大部分为建筑性损伤导致的使用性能降低。对此,Bjerrum<sup>[92]</sup>在给出的角扭曲建议值时主要考虑了内部设备的使用状态,Coduto<sup>[83]</sup>在设定相关阈值时还充分考虑了装饰装修材料的敏感性。

已有部分国家建议将差异沉降作为一种荷载工况纳入结构设计过程中予以考虑,从而增强建筑对潜在不均匀沉降风险的抵抗能力。然而,差异沉降的分布及其演化具有显著的随机性和不确定性,传统确定性限值方法难以全面反映其风险特征。为此,概率统计与可靠度分析方法被用于差异沉降控制指标的定量化取值研究,以支撑差异沉降在结构与极限状态评估中的合理取值。Zhang 等<sup>[93]</sup>通过对全球范围内 380 座建筑的分析,建立了可直接用于全概率与常规设计或确定极限状态的允许沉降概率分布,并提供了安全系数为 1.5 及超越概率为 0.05 时不同建筑类别的允许最大沉降和角扭曲建议值表格。

值得注意的是,以往学者进行地基不均匀沉降限值与建筑损伤的关联性研究时,往往以倾斜通常不引起裂缝等原因剔除了建筑自身刚体倾斜的影响(如角扭曲),关于建筑倾斜与建筑损伤关系的研究亦较少。后有学者对此进行了重新审视,系统分析了二者间相互关系。Charles 等<sup>[94]</sup>指出,倾斜主要影响建筑视觉效果与使用性能,并基于大量观测研究建立了低层建筑倾斜由可觉察到高风险的分级阈值界限。Namazi 等<sup>[95]</sup>则认为倾斜会在自重作用下引起结构附加拉应力,削弱建筑对差异沉降的承受能力,同样给出了相应的多级损伤倾斜阈值,其结果与 Charles 等<sup>[94]</sup>所得结论高度一致。

### 3.1.2 理论分析方法

基于经验分析总结的宏观变形指标,尽管具有较好的参考价值,但难以对各种影响建筑变形允许值界定的因素进行全面考虑。特别是,角扭曲的定义在后续研究中被赋予了不同的物理意义(如坡度),可能发生混淆,造成对损伤等级的误判。为此,学界逐步发展出基于临界应变理论的微观损伤理论分析方法,研究重点亦从建筑物自重诱发的沉降问题,扩展至受地下工程施工、采矿活动等外部扰动因素影响下的结构响应与损伤评估。理论分析基于合理假设构建建筑简化力学计算模型,以模型本构关系为约束建立建筑宏观变形与结构微观应变间数学关系,进而结合既有损伤分级体系给出评估标准。

在建筑损伤等级分类方面,尽管 Skempton 等<sup>[79]</sup>将建筑损伤分为视觉性、建筑性以及结构性 3 个等级,但并未明确给出建筑损伤指标。为此,Burland 等<sup>[96]</sup>基于上部结构墙体裂缝发展特征及其修复难易程度,进一步细化了建筑损伤等级分类。基于此分类标准,系统建立了各类评价指标与建筑损伤等级间相互关系,并给出了相应的分级界限阈值,如表 5 所示。在等效模型方面,Burland 等<sup>[96]</sup>将建筑物简化为受中心点荷载的简支各向同性弹性深梁,该深梁模型使用相对简便且能满足对建筑结构类型、材料以及变形模式(主要是凹陷和凸起)的差异性描述。该模型在后续得到其他学者的沿用与发展,但其对建筑参数的过度简化导致在建筑体型差异表征及建筑存在多种变形模式耦合时的适用性不足,且忽略了建筑不同构件间承载差异及相互作用机制。为此,Finno 等<sup>[101]</sup>通过假设楼板抵抗弯曲变形、承重墙与柱抵抗剪切变形,提出了一种适用于多层建筑的层压板梁模型,可同时考虑弯剪耦合变形。

表5 建筑损伤等级分类及相关指标阈值

Table 5 Damage grade classification and related indicators-thresholds

研究者	分析方法	适用对象	类别/指标	损伤分类及相应阈值					
Skempton等 <sup>[79]</sup>	经验分析	一般建筑	损伤程度	视觉性	建筑性			结构性	
Burland等 <sup>[96]</sup>	理论分析	一般建筑	损坏等级	可忽略	非常轻微	轻微	中等	严重	非常严重
			裂缝宽度	<0.1 mm	<1 mm	<5 mm	5~15 mm	15~25 mm	>25 mm
Rankin <sup>[97]</sup>	经验分析	一般建筑	最大沉降	<10 mm			10~50 mm	50~75 mm	>75 mm
			坡度	<1/500			1/500~1/200	1/200~1/50	>1/50
Boscardin等 <sup>[98]</sup>	理论分析	单层砌体建筑	拉应变	<0.05%	0.05%~0.075%	0.075%~0.15%	0.15%~0.3%	>0.3%	
			角扭曲	<1.1‰	1.1‰~1.6‰	1.6‰~3.3‰	3.3‰~6.7‰	>6.7‰	
Schuster等 <sup>[99]</sup>	理论分析	一般建筑	DPI凹陷	<10	10~15	15~30	30~60	60~85	>85
			DPI凸起	<5	5~10	10~25	25~50	50~80	>80
Namazi等 <sup>[95]</sup>	理论分析	一般单层建筑	倾斜率	<1/120	1/120~1/100	1/100~1/70	1/70~1/50	>1/50	
Day等 <sup>[100]</sup>	经验分析	木框架结构	差异沉降	<3 cm	3~4 cm	4~5 cm	5~8 cm	8~13 cm	>13 cm
			角扭曲	<1/300	1/300~1/240	1/240~1/175	1/175~1/120	1/120~1/70	>1/70

Namazi等<sup>[102]</sup>则提供了一种厚板模型,可进一步反映建筑在三维变形模式下的扭转行为。

对于损伤评估指标,鉴于建筑开裂受临界拉应变控制,早期研究大多聚焦于拉应变指标,后续考虑到实际情况中建筑往往受水平拉伸与竖向剪切的复合作用影响,而研究表明建筑对拉应变和剪切变形的承受能力存在一定的相互削弱关系,即初始水平应变的存在会降低建筑对附加剪切变形的承受能力,反之亦然<sup>[98-103]</sup>。为此,Son等<sup>[104]</sup>提出利用平面应变力学公式结合剪切应变与拉伸应变计算主应变,以考虑这种耦合效应。Schuster等<sup>[99]</sup>则给出一种将主应变值进行归一化以百分制表达的简化评估(DPI)模型,可更直观表征建筑物损伤等级。

### 3.1.3 有限元分析方法

无论是经验分析所提出的建筑变形控制指标,还是理论分析的临界应变指标,其本质上都在于对差异沉降所引发的结构附加内力与建筑自身抗力间关系的衡量。不同的是,经验分析中的建筑变形指标未能量化这种附加效应,但在某种程度上可视为其间接宏观表征。相比之下,基于临界应变的理论分析方法则通过力学模型实现了附加内力的显式表达,因而更能反映建筑的损伤机理,但对理论模型的选取要求严苛,且简化模型难以满足全面反映多元复杂建筑结构损伤演化机制的差异性和具体表征。另外,地基土-结构间的相互调节作用无法准确量化将导致评估结果的偏差,已有考虑土-结构相互作用的有限元研究表明,土体对建筑变形的约束作用减少了建筑可能发生的差异沉降,这意味着理论分析方法一定程度上造成了对建筑损伤程度的高估<sup>[105]</sup>。

为此,开展精细化有限元模拟,在对建筑结构

与地基土进行完整建模的情况下可实现对土-结构相互作用进一步解耦,并有助于直观评估结构整体的损伤状态与演化机理。截至目前,针对沉降所引发的各类建筑结构响应进行了深入的仿真模拟研究,系统分析了不同结构类型建筑在不同沉降场下的结构响应,如框架结构的梁、柱及节点应力分布规律<sup>[106-107]</sup>,砌体和砖混结构墙体的裂缝发展趋势<sup>[108-110]</sup>等。综合来看,以建筑变形为输入的结构损伤有限元分析已得到广泛应用,建筑变形与结构损伤特征间的映射关系亦得到了进一步完善,但仍缺乏关于建筑损伤等级与相应变形阈值间量化关系的系统性基准仿真试验研究。此外,理论分析和有限元分析的本质都在于以材料破坏描述建筑损伤,关键参数材料临界应变通常由试验结论得出,除材料本身固有的离散性外,其性能、力学指标及表观形态将随服役时间推移而发生不可逆、非线性的累积性劣化衰退,该过程的主要致因包括环境作用(物理、化学及生物侵蚀老化)、荷载累积效应(静载徐变/松弛、动载疲劳)以及其他人为干扰(不当维修、意外损伤),如何定量描述这种材料时变退化特征仍有待深入研究<sup>[111]</sup>。

### 3.2 国内外规范标准规定

不同国家以及同一国家不同地区的规范之间存在一定程度的差异,所考虑的因素,侧重点亦有所不同。为此,系统梳理中国、美国、欧洲及其他主要国家在建筑安全鉴定领域的规范标准和相关专著20余本。表6和表7中展示了相关国家已有涉及地基基础沉降限制的具有代表性的规范建议。对上述规范标准规定进行综合对比分析,结果表明:

1) 累计沉降。主要为防止差异沉降的发展,国内对总沉降量的限制相对宽松。在GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》<sup>[112]</sup>中仅对高层及高耸

表6 国内外主要工程规范对比

Table 6 Comparison of major domestic and international engineering codes and standards

地区	规范/来源	指标选取	特殊规定
中国	GB 50007—2011 <sup>[112]</sup>	沉降、沉降差、倾斜及局部倾斜	指标依据地基变形特征分类选取
	DBJ 11 501—2009 <sup>[113]</sup>	累计沉降、倾斜	区分高层与多层,考虑地基土类型和高宽比
	JGJ 125—2016 <sup>[114]</sup>	沉降(速率)、倾斜(增速)、裂缝、基础水平位移	适用建成2年后建筑,区分高层与中低层
美国	ASCE/SEI 7-16 <sup>[115]</sup>	差异沉降	考虑建筑的重要性等级和损坏影响大小
	EM 1110-1-1904 <sup>[116]</sup>	最大平均沉降、挠度比和角扭曲	考虑地基土、建筑体型、结构和装饰敏感性
欧洲	EN 1997-1-2004 <sup>[86]</sup>	总沉降、差异沉降、角扭曲	考虑沉降模式影响
澳大利亚	AS2870-2011 <sup>[117]</sup>	差异沉降	阈值设定考虑结构类型和建筑跨度
加拿大	加拿大规范 <sup>[118]</sup>	总沉降、角扭曲、倾斜、挠度比	区分结构形式,考虑沉降模式影响
荷兰	荷兰规范 <sup>[119]</sup>	裂缝、沉降速率、倾斜	适用于一般浅基础建筑使用阶段
新加坡	新加坡规范 <sup>[120]</sup>	总沉降、相对运动	考虑建筑层数与年份划分风险等级
中国	香港规范 <sup>[121]</sup>	最大总沉降、角扭曲、倾斜	对临近地下施工建筑规定了三级预警阈值
苏联	HNTY-127-55 <sup>[122]</sup>	总沉降、沉降差、挠度比	考虑建筑长高比,我国TJ 7—1974主要参考源

表7 不同规范建筑风险评估指标及阈值对比

Table 7 Comparison of building risk assessment indicators and thresholds across different codes

指标	来源	阈值设定	适用对象
累计沉降	欧洲 EN 1997-1-2004 <sup>[86]</sup>	50 mm	一般建筑
	中国 GB 50007—2011 <sup>[112]</sup>	200 mm	简单高层
	中国 DBJ 11 501—2009 <sup>[113]</sup>	30~120 mm	多层建筑
	美国 EM 1110-1-1904 <sup>[116]</sup>	60~159 mm	高层建筑
	美国 EM 1110-1-1904 <sup>[116]</sup>	50 mm	一般建筑
	新加坡规范 <sup>[120]</sup>	25~50 mm	浅基础低层建筑
	香港规范 <sup>[121]</sup>	30 mm	一般建筑
沉降速率	中国 GB 50911—2013 <sup>[123]</sup>	10~30 mm	一般建筑
	荷兰规范 <sup>[119]</sup>	每年 4 mm	浅基础建筑
	中国 JGJ 125—2016 <sup>[114]</sup>	每月 4 mm	单层和多层建筑
	中国 GB 50292—2015 <sup>[124]</sup>	每月 2 mm	一般民用建筑
	中国 GB 50911—2013 <sup>[123]</sup>	1~3 mm/d	一般建筑
	中国 GB 50144—2019 <sup>[125]</sup>	0.05 mm/d	工业建筑
倾斜	中国 GB 50497—2019 <sup>[126]</sup>	2~3 mm/d	一般建筑
	Coduto <sup>[83]</sup>	0.2%	一般建筑
	中国 GB 50007—2011 <sup>[112]</sup>	0.2%~0.4%	多层和高层建筑
	中国 JGJ 125—2016 <sup>[114]</sup>	1%~3%	多层建筑
倾斜增速	中国 GB 50497—2019 <sup>[126]</sup>	0.5%~0.7%	高层建筑
	中国 GB 50497—2019 <sup>[126]</sup>	0.2%	一般建筑
水平位移	中国 JGJ 125—2016 <sup>[114]</sup>	每月 0.05%	高层建筑
	中国 GB 50497—2019 <sup>[126]</sup>	0.01%/d	一般建筑
沉降差	Coduto <sup>[83]</sup>	7~20 mm	一般建筑
	中国 JGJ 125—2016 <sup>[114]</sup>	10 mm	单层和多层建筑
	美国 ACI 318-89 <sup>[85]</sup>	20 mm	一般建筑
	欧洲 EN 1997-1-2004 <sup>[86]</sup>	20 mm	一般建筑
	中国 GB 50007—2011 <sup>[112]</sup>	0.002l~0.003l (l代表相邻柱基间距离)	框架结构
	苏联 HNTY-127-55 <sup>[122]</sup>	0.002l	框架结构
	澳大利亚 AS 2870-2011 <sup>[117]</sup>	10 mm 与跨度的 1/2 000 取小值 40 mm 与跨度的 1/300 取小值	砌体结构 框架结构
角扭曲	中国 GB 50911—2013 <sup>[123]</sup>	0.001l~0.002l	一般建筑
	欧洲 EN 1997-1-2004 <sup>[86]</sup>	凹陷沉降 1/500, 凸起折减 1/2	一般建筑
	中国 GB 50007—2011 <sup>[112]</sup>	0.002~0.003	砌体承重结构
	加拿大规范 <sup>[118]</sup>	损坏 1/250~1/150; 开裂 1/500	框架结构
	美国 EM 1110-1-1904 <sup>[116]</sup>	开裂 1/500, 结构性破坏 1/150	一般建筑
挠度比	香港规范 <sup>[121]</sup>	1/500	一般建筑
	苏联 HNTY-127-55 <sup>[122]</sup>	当长高比不大于 3 时, 0.000 3~0.000 4 当长高比不小于 5 时, 0.000 5~0.000 7	多层砌体结构
	加拿大规范 <sup>[118]</sup>	凹陷沉降 1/2 500~1/1 250, 凸起折减 1/2	砌体承重结构
美国 EM 1110-1-1904 <sup>[116]</sup>	砂土 1/1 000; 黏土 1/500	框架结构	

结构限制了总沉降量, DBJ 11 501—2009《北京地区建筑地基基础勘察设计规范》<sup>[113]</sup>则分别针对高层和多层建筑给出了更详细的限值规定。一般建筑和地土条件下国际上常用建议值为25~30 mm。

2) 沉降速率。国内规范相较于国外更为关注的评估指标,且更强调近期趋势的敛散性。JGJ 8—2016《建筑变形测量规范》<sup>[32]</sup>则将其作为建筑稳定状态的评估依据;国外对沉降速率的限制较为宽松,除荷兰规范<sup>[119]</sup>外,未见其他对沉降速率给出相关规定,这与Grant等<sup>[89]</sup>的研究有关,即沉降速率仅在极端条件下影响建筑的沉降允许值。在沉降速率阈值设定方面,国内JGJ 125—2016《危险房屋鉴定标准》<sup>[114]</sup>与GB 50292—2015《民用建筑可靠性鉴定标准》<sup>[124]</sup>分别给出每月4 mm和每月2 mm,差异主要源于评估结果对应的危险程度不同,前者代表需要修缮加固,而后者代表需要立即停用或拆除;另外,考虑到建筑自建成到使用过程中两年即可完成大部分沉降并趋于稳定,故荷兰规范每年4 mm和国内规范每月4 mm的阈值对于稳定状态评估在一定程度上差异不大。

3) 倾斜率及倾斜速率。对于刚性建筑,差异沉降会导致上部结构出现整体倾斜,国内对建筑的倾斜限制要严于国外,对高层的限制严于中低层建筑,并对高层建筑单独设置了倾斜率增速阈值规定,主要是为了防止建筑倾斜超限。

4) 差异沉降。国内外对差异沉降的控制存在较大差异,国外对角扭曲与挠度比等指标设定了相关阈值的同时还限制了20 mm的差异沉降量。国内与苏联规范<sup>[122]</sup>相同,注重比例的限制而未规定绝对差异沉降量,并根据地基变形特征有针对性地制定了不同的控制指标,此分类控制思想亦在加拿大规范<sup>[118]</sup>中得以体现。

5) 水平位移。国内外关于建筑基础允许水平位移量的建议较少,基础水平位移通常为地下开挖等活动导致地基失稳诱发的,其危害较自重作用下竖向沉降更大,学术界采用拉应变指标量化其对建筑影响程度。在建筑上部结构尺度,水平位移表现为建筑在水平荷载作用下产生的侧向位移,通常采用层间位移角作为控制指标。

6) 沉降模式。地基变形模式是影响建筑沉降允许值的一个关键因素,以往的研究证明,建筑对凸起沉降的承受能力比对凹陷沉降的承受能力低得多,现有规范如欧洲EN 1997-1-2004<sup>[86]</sup>及加拿大规范<sup>[118]</sup>,规定凸起沉降的建议允许值为凹陷沉降的50%,国内规范则没有提及这一点。

7) 其他影响因子。根据前述讨论,建筑材料

性能及其整体完整性将随使用年限增加而退化,仅新加坡规范<sup>[120]</sup>在设定阈值界限时考虑了建筑年份。另外,美国ASCE/SEI 7-16<sup>[115]</sup>则根据建筑的重要性等级划分了不同的控制阈值。

## 4 基于InSAR技术的建筑风险评估

### 4.1 现有InSAR规范体系

国内关于InSAR的规范大多侧重于InSAR技术进行地表形变监测时数据处理过程的标准化和系统化,以确保监测结果的准确可靠。其中以行业标准CH/T 6006—2018《时间序列InSAR地表形变监测数据处理规范》<sup>[127]</sup>及国家标准GB/T 44146—2024《基于InSAR技术的地壳形变监测规范》<sup>[128]</sup>的规定最为详尽。国际上针对InSAR技术制定的标准规范较少,且仅作了相关的原理性介绍<sup>[129-130]</sup>。

关于利用InSAR技术对房屋建筑进行风险评估及预警,国内已有两部规程指南:其中一部为深圳市应急管理联合会团体标准T/SZEMA 0002—2023《InSAR沉降监测预警规范》<sup>[131]</sup>,该规范根据建筑的特征规定了四类优先监测的建筑关键部位,并选取了近3年累计沉降量及近2个月平均沉降速率作为房屋建筑风险筛查标准。另一部为T/CECS 1165—2022《建筑安全星载干涉雷达监测技术规程》<sup>[132]</sup>,该规范根据近3年累计沉降量、累计倾斜率及近1年月沉降速率、月倾斜速率4个评估指标分别进行建筑安全风险评价,并取其中的最高等级作为最终评估结果。该规范给出的建筑变形阈值与国家有关建筑风险评估的现行标准<sup>[114,124]</sup>存在差异,其主要是考虑了星载InSAR建筑变形观测的特点与数据处理方法的选择,由大量工程应用实例统计分析得到。

### 4.2 基于InSAR技术的建筑风险识别与评估

图7总结性地展示了InSAR技术在建筑风险识别评估研究与实际应用中的一般化处理流程。星载InSAR技术能够获取建筑变形的时间序列和空间分布信息,兼具时序观测精度与空间覆盖优势。如何将InSAR监测数据转化为结构安全信息,现有研究形成了不同的技术路线。

#### 4.2.1 基于单一点位时序变形的风险评估方法

根据海恩法则,任何重大事故的发生,其必然存在一定的前期表征。星载InSAR技术在建筑长时间序列变形获取方面具有独特优势,可用于建筑事故发生后致因调查溯源与事故发生前风险预警。文献[133-135]的长期监测数据发现,倒塌建筑在事故发生前存在明显的变形加速趋势亦或是

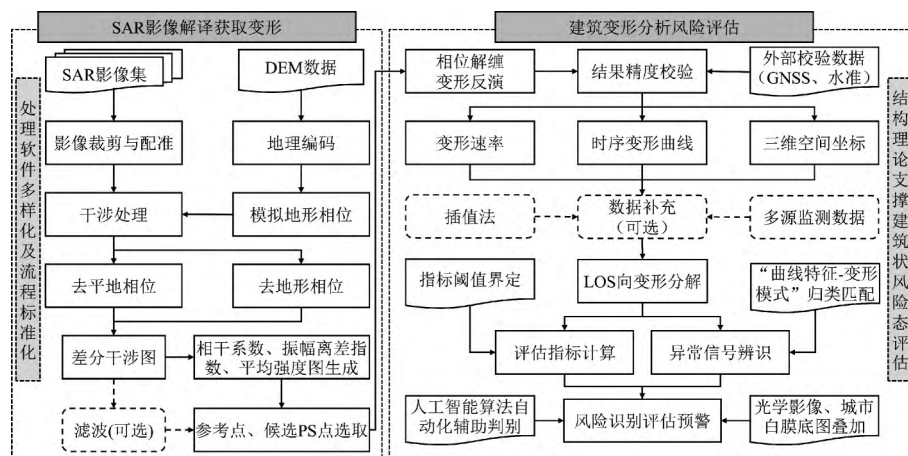


图7 InSAR建筑变形监测与风险评估一般流程

Fig. 7 General workflow for InSAR building deformation monitoring and risk assessment

时序变形曲线的跳跃性突变。进一步统计特征分析表明,灾变建筑区域监测点时序形变曲线表现出不稳定性,通过分析整体变形趋势和最终演变趋势差异,可有效识别存在潜在风险的建筑<sup>[136]</sup>。

综上可见,基于InSAR技术的建筑变形时间序列分析有望实现对建筑潜在风险隐患的早期识别与风险预警。InSAR技术提供时序高精度、空间高覆盖密度(城市区域每平方千米可达数万个监测点,单个建筑结构覆盖数十至数百个监测点)数据的同时,亦带来了挑战:其一,人工逐点判读监测点时序变形信号效率低且易受主观影响;其二,建筑变形物理机制与时序曲线数据特征关联困难,即何为“异常”定义模糊。为此,亟需融合智能识别算法,实现风险建筑及其异常变形模式的自动化或半自动化精准辨识,以充分挖掘InSAR技术在城市大范围建筑风险筛查中应用潜力。Kuzu等<sup>[137]</sup>将建筑变形归纳为趋势异常、噪声异常及台阶异常三种位移时间序列信号,并提出基于无监督学习的自动化建筑异常变形检测方法。Raspini等<sup>[138]</sup>通过识别变形时序曲线最近150 d内的异常变化时间节点 $T_0$ ,分别计算 $T_0$ 前后变形速率 $V_1$ 、 $V_2$ ,最后计算差异变形速率 $\Delta V=V_2-V_1$ ,当 $\Delta V>10\text{ mm/a}$ 时判定为异常点。这两种路径的核心是,均在于将海量InSAR数据传统人工定性判读,转化为基于明确规则或模型的智能化定量诊断。

#### 4.2.2 融合结构理论的风险评估方法

为了更系统全面地利用建筑变形信息评估建筑安全状态,实现更准确可靠的建筑风险识别排查,一些学者沿用或引入了结构领域诸多变形指标和相关理论。其中,应用最广泛的为基于相对变形理念衍生的系列变形梯度指标。相比于单一点位的绝对变形,此类相对变形指标更能反映建

筑的损伤状态。研究表明,建筑物的裂缝开展方向几乎总是垂直于沉降梯度方向,且损伤程度与梯度大小呈现明显正相关性<sup>[139-140]</sup>。类似地,相较于沉降速率,利用沉降速率梯度进行建筑风险识别与等级评估,表现出更好的判别能力<sup>[141]</sup>。另外,考虑到水平拉伸对建筑的危害性更强,左世诚等<sup>[142]</sup>提出了一种结合垂直向和水平向变形梯度的综合风险评估方法。

现有研究中利用InSAR变形数据由角扭曲(沉降梯度)指标向建筑风险等级转译时,通常采用直接分析法和栅格化坡度分析法两种主流方法。其中,直接分析法利用原始InSAR监测点时序变形数据及其空间坐标信息,直接以两点间累计沉降差值与其距离之比计算角扭曲。可最大程度保留变形信息并避免中间处理误差,结果可靠性高,但需配套开发自动化算法以支撑大规模数据处理。栅格化坡度分析法则首先将监测点时序变形数据直接或经插值转化为规则栅格,再借助地理分析系统(geographic information system, GIS)坡度分析工具<sup>[143]</sup>获取角扭曲。因其依托现有成熟软件化工具,可大范围自动计算、应用门槛低且空间可视化能力强。然而,栅格化过程受栅格尺寸限制会对密集分布的监测点数据进行聚类处理,局部关键变形细节可能被掩盖而导致结果偏差。两种方法均根据计算结果参照既定阈值划分建筑风险等级。

截至目前,基于各类变形梯度指标的建筑风险识别方法,其可行性与可靠性均已在实际工程应用中得到了充分验证。然而,在建筑损伤程度的量化评估上,由于缺乏统一的建筑风险等级分类基准,导致不同研究在评估指标选取及阈值界限设定上不尽相同,难以横向对比。虽然Cabral

等<sup>[144]</sup>通过对沉降梯度观测值进行简单线性分类划分风险等级,具有统计意义,但是不具备理论依据。为此,有学者基于土木工程领域已有研究给出的经验宏观变形阈值,给出了相应的风险分级方法<sup>[145-146]</sup>。在此基础上,开发相应的自动化评估流程算法,可实现“建筑级”损伤等级的自动评估<sup>[147]</sup>。这种方法在一定程度上提高了风险识别的准确性,但完全依赖数据驱动的评估方式忽视了建筑结构本身的物理特性差异,可能导致评估结果存在偏差。另外,变形指标计算时数据处理方法的选择亦会影响与工程规范的有效对接。例如:Drougkas等<sup>[148]</sup>和Liu等<sup>[149]</sup>均利用了相关拟合方法基于PS点构建了反映建筑变形状态的特征平面。其中,Drougkas等<sup>[148]</sup>基于拟合平面进一步计算了角扭曲、挠度比、倾斜及拉应变,并在依据已有经验阈值进行损伤评估时充分考虑了建筑的结构类型,但采用不同指标得到的风险评估结果却存在一定差异。而Liu等<sup>[149]</sup>则基于拟合平面构建了反映建筑倾角的不均匀沉降指数,研究发现,使用不均匀沉降指数0.0009为阈值可以较好识别出高风险建筑,而不均匀沉降指数低于0.0002的建筑则相对安全,这显然与工程上常用的0.002倾斜限值存在数量级的差异。

如前所述,使用应变指标直接描述材料破坏更能反映建筑损伤,为此,部分学者采用已有的简支深梁<sup>[63]</sup>或层压板梁<sup>[150]</sup>模型,结合InSAR变形数据计算结构拉应变,并依据相应的拉应变损伤评估体系研判建筑损伤等级,得到了与实际吻合良好的评估结果。进一步,还可结合有限元技术以不同时刻下建筑的变形为输入,分析建筑构件和整体的应力状态,进而明确建筑在各阶段下的损伤程度<sup>[151]</sup>。但此方法目前仍仅限于单体建筑风险评估,而难以拓展应用于大范围建筑群,因为:一方面其对建筑先验信息的完整性依赖性高;

另一方面完整建模情况下计算资源的需求量庞大。为此,有必要进一步分析已有理论分析模型在仿真模拟分析中作为代理模型的可行性,或提出适用性更强的建筑简化代理模型,工程界已有应用于建筑群地震动力损伤评估的弯剪耦合模型<sup>[72]</sup>,具有一定参考意义。

#### 4.2.3 结合工程规范的风险评估方法

尽管结合InSAR技术和结构理论已有多种方法用于建筑安全风险评估,并取得了可观的评估效果。但受技术本身以监测变形为核心的固有限制,现有研究仍多聚焦于数据驱动,且缺乏相应理论支撑,导致评估效果欠佳,漏报和误报率较高。为此,已有学者尝试将监测结果与现有工程规范相结合,以期提高评估结果的可靠性,如表8所示。

由表8可见,利用InSAR技术获取建筑变形信息并据此进行风险评估的已有研究中,虽都参考了现行规范,但所选规范却横跨土木、地灾、能源及遥感等多个学科领域,相对应的评估指标与阈值亦相差较大。如何考虑不同领域规范乃至相同领域不同规范之间的兼容性和差异性,建立一套统一的评价标准和框架仍是进一步提高评估效率与准确性亟需解决的一大研究重难点。

### 4.3 工程规范与InSAR技术对接需考虑问题

#### 4.3.1 监测精度与误差问题

InSAR技术监测精度是决定其用于建筑风险评估的可行性与否的关键,主要取决于数据源及数据处理方法的选择,表9总结了不同波段SAR表现特征及InSAR精度支持差异。尽管D-InSAR技术厘米级及TS-InSAR技术的毫米级理论精度甚至更高,已得到实例研究验证<sup>[20,158]</sup>,满足用于建筑安全初步评估的条件。

然而,InSAR技术在建筑变形监测中的毫米级精度为相对精度,而非绝对精度,其相对性体现在时间和空间两个维度。时间上,InSAR技术

表8 已有结合工程规范的研究  
Table 8 Existing research integrating engineering codes

文献	参考标准	研究区域	主要指标	风险阈值
Li等 <sup>[62]</sup>	《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》 <sup>[64]</sup>	安徽矿区	倾斜、地表曲率	具体见规范 <sup>[64]</sup>
费毕刚等 <sup>[152]</sup>	JGJ 125—2016《危险房屋鉴定标准》 <sup>[115]</sup>	北京城区	累计倾斜率、近期沉降及倾斜速率	表格形式数据
夏锐等 <sup>[153]</sup>	GB 50292—2015《民用建筑可靠性鉴定标准》 <sup>[116]</sup>	辽宁矿区	年沉降速率	24 mm/a
Han等 <sup>[154]</sup>	GB/T 40112—2021《地质灾害危险性评估规范》 <sup>[155]</sup>	郑州城区	年沉降速率	30 mm/a
Xu等 <sup>[156]</sup>	GB/T 40112—2021《地质灾害危险性评估规范》 <sup>[155]</sup>	南京城区	累计沉降量、年沉降速率	40 mm, 30 mm/a
朱茂等 <sup>[157]</sup>	T/CECS 1165—2022《建筑安全星载干涉雷达监测技术规程》 <sup>[132]</sup>	长春城区	近3年累计沉降量、累计倾斜率及近1年月沉降速率、月倾斜速率	具体见规范 <sup>[132]</sup>

表9 不同波段SAR表现特征及InSAR精度支持<sup>[128]</sup>  
Table 9 Performance characteristics of different SAR bands and InSAR accuracy support<sup>[128]</sup>

波段	分辨率/m	穿透能力	大气影响	监测精度	
				D-InSAR	TS-InSAR
L波段	20~50	强	小	10 mm	每年5~8 mm
C波段	5~20	中等	中等	8 mm	每年2~5 mm
X波段	1~5	弱	大	5 mm	每年2~3 mm

是基于影像间相对相位的测量而无法测定影像的绝对相位,其结果表征为目标点相对于选定参考时刻(通常以数据集首景影像时刻为零变形基准)的位移变化。空间上,在解算相位反演变形时又需选定一个或一组稳定无变形目标作空间参考,所有测点变形量均为相对于参考点的差值。若参考点本身存在微小位移,则整个场域的变形测量结果会产生一致性偏移,在多帧变形场拼接时此偏移还会积累为系统性误差<sup>[159]</sup>。

除前述相对性影响外,InSAR技术在实际工程应用中,其测量精度还受多种系统性、随机性误差源共同影响,部分主要误差类型及应对策略如表10所示。鉴于此,对最终监测结果的精度验证仍是必不可少的环节,可借助外部监测数据如地面水准测量数据或GNSS站点数据对InSAR计算结果进行校核。根据JGJ 8—2016《建筑变形监测规范》相关规定,对于以保障建筑安全为目标的变形测量,建议设定建筑变形允许值的1/20~1/10作为测定的中误差阈值<sup>[32]</sup>。对于InSAR测量结果误差超出预定阈值的情况,应当采取相应的措施,以确保监测和评估结果的可靠性。

#### 4.3.2 监测点分布不确定性问题

InSAR技术与传统监测方法的显著差异在于监测点分布的不确定性,主要体现在两个方面:

1) 执行监测作业前,InSAR技术监测点的位置通常是未知,由地面散射体的物理特性和卫星成像参数决定,导致监测点在目标区域内的分布具有不确定性<sup>[161]</sup>。这种特性在大范围监测中具备优势,但在对单一房屋建筑的监测中却表现出明显的局限性,易造成对非感兴趣对象的过采样或感兴趣对象的欠采样甚至不采样。为此,可基于数值模拟逆向开展不同损伤机制下的结构变形反演,确定状态评估所需最优监测点数量和位置,削弱对高密度数据依赖性的同时保证了评估结果的准确性<sup>[162]</sup>。

2) 监测任务完成后,对获取的变形信号进行科学解译是监测数据完成成果转化的关键。其中监测点三维定位精度对于能否准确识别单个变形信号所对应的建筑物特定部分变形至关重要。杨梦诗等<sup>[163]</sup>对该问题进行了系统梳理,发现时序InSAR相干点定位精度一般为米级。此外,由于电磁波的复杂散射特征,会造成变形信号三维位置与其物理真实性相矛盾,导致变形起源识别不明,高阶多次散射信号所反映的真实变形量亦难以确定,如图8所示,限制了InSAR技术在单体建筑变形精细化监测中的应用。因此,确定“散射体-观测场景-建筑结构/构件”之间归属关系,是当前弥合传统工程观测与InSAR观测结果差异,进而提高建筑风险评估可靠性的关键<sup>[164]</sup>。

#### 4.3.3 监测点密度问题

考虑到InSAR只能直接获取观测目标一维LOS向变形信息的技术局限性,几乎所有的建筑变形指标都需要通过二次处理才能得到。如结合多源数据进行三维形变分解,亦或通过升降轨数据融合忽略南北方向形变作2.5D分解,从而获取

表10 InSAR技术测量精度主要误差源<sup>[17,160]</sup>  
Table 10 Main sources of error affecting measurement accuracy of InSAR technology<sup>[17,160]</sup>

误差类型	具体来源	误差类型	抑制策略
大气延迟	大气层中传播介质的非均匀性导致电磁波传播速度和传播路径变化进而产生的相位误差,包括电离层和对流层延迟	系统、随机	结合外部气象数据建立大气校正模型
轨道误差	卫星轨道不精确性及卫星姿态不稳定性导致对两次轨道时空状态矢量(即干涉基线)估计存在偏差	系统	使用精密轨道数据预处理、利用地面控制点拟合多项式精炼轨道或滤波去除残余相位
地形数据误差	外部数字高程模型(DEM)的不准确性及其与雷达影像之间的几何配准偏差	系统、随机	采用高精度DEM数据、对SAR影像与DEM数据进行精配准
失相干误差	不同影像成像时刻地物目标散射特性变化(时间失相干)及卫星雷达侧视角度不同(空间失相干)产生的相位偏差	随机误差	优化干涉对组合提升干涉质量、进行多视轨联合处理增加观测冗余并提高时间分辨率
多路径效应	SAR信号经建筑物不同部分(如墙面、地面)多次反射后叠加到主回波上,干扰相位测量	系统、随机	选择稳定点或角反射器、选择合适的成像参数、进行多视处理及利用辅助数据校正
相位解缠误差	由于噪声干扰、地形起伏引发叠掩与阴影及变形梯度过大等导致干涉相位不连续使相位解缠产生误差甚至错误	系统、随机	采用先进时空滤波方法抑制噪声提高干涉质量以及选择稳健解缠算法
形变模型失配	时序分析中由于假设的变形模型(如线性变形)与真实场景复杂变形不符造成目标变形反演误差	系统	结合外部先验信息建立合适形变模型、采用SBAS-InSAR等无假设或弱假设方法

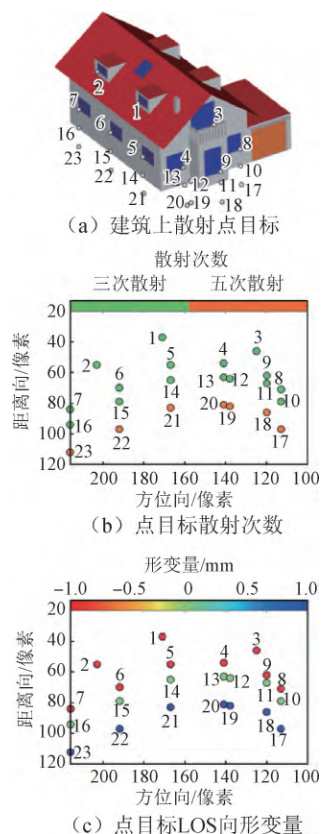


图8 单栋建筑物下沉InSAR变形信号模拟<sup>[163]</sup>  
 Fig. 8 Simulation of InSAR deformation signals for the sinking of a single building<sup>[163]</sup>

建筑的竖向和东西向变形信息,在某些情况下还可忽略水平位移只考虑竖向位移<sup>[165]</sup>。而对于其他评估指标如倾斜、沉降差等,则需要通过建筑区域内两个或多个监测点间的相对变形差异和空间位置信息进一步进行空间分析获取。无论以何种方式利用建筑变形信息进行安全风险评估,均须确保足够的InSAR监测点数量。

针对监测点密度不足问题,使用高分辨率SAR卫星影像数据是最直接有效的解决方案。然而,高分辨率SAR数据带来高监测点密度的同时,亦加重了城市高层建筑密集区域的叠掩效应,造成传统PS-InSAR无法正确解算建筑表面变形量。此时,结合TomoSAR原理处理多视角SAR数据分离叠掩PS点可一定程度上增加可用监测点<sup>[166]</sup>。在相干性、雷达反射率较低的郊区或农村地区,会导致PS点密度严重不足,在此情况下,联合探测PS点和DS点则可以大幅提高监测点密度<sup>[167-168]</sup>。另外,亦有学者提出了一种全散射体方法<sup>[169]</sup>(full scatters InSAR, FS-InSAR),选择除水体外的所有地物目标进一步提高了地面变形监测点密度。然而,考虑到实现过程复杂且计算资源消耗过大,难以满足在实际工程中的产业化应用。以上方法可

归纳为基于SAR卫星分辨率及算法处理的监测点密度优化方法<sup>[170]</sup>,也是目前主流和较为可靠的手段。除此之外,亦有学者提出了数据融合方法用于提高空间监测点密度,如多轨道卫星影像监测点数据融合<sup>[171-172]</sup>、多波段卫星监测结果融合<sup>[173]</sup>以及多极化数据集成<sup>[174]</sup>等。综合来看,通过使用上述方法获取的监测点密度通常足以满足一般建筑的沉降信息提取。然而,在可用数据有限导致监测点仍然不足或需要构建建筑连续变形场的情况下,可选择合适的插值法进行补充<sup>[39,145,175]</sup>。然而,插值法是一种拟合手段,利用已知的离散数据点,通过不同的数学算法来推断未知点的值。不同的插值方法会得到不同的结果,在已知点密度过低的情况下还会导致插值结果失真,应用时应结合实际情况合理选择插值模型并对结果进行相关验证。由于监测点定位精度、地理配准精度与SAR卫星分辨率限制以及坐标系统转换误差累积等因素使得监测点与建筑物图层之间不可避免地存在偏移,造成单个建筑物轮廓内可用的监测点数量不足的问题,在此情况下,从根源上解决这类问题仍有较大阻力,部分研究通过将建筑物轮廓进行外延增加可用的监测点数量进而进行风险评估<sup>[148]</sup>。

此外,变形速率过高或变形模式与预设变形模型不同将导致区域性监测点缺失。在进行时序InSAR处理时,常用的是线性变形模型,实际工程中,房屋建筑及基础设施会由于各种因素产生各种形式的非线性变形。此时,使用简单线性变形模型不仅会影响监测结果的可靠性,甚至会导致区域性监测点采样失败。例如:Yan等<sup>[176]</sup>通过数据模拟发现,加速度的存在不仅会使PS-InSAR识别的PS点数量减少,还会影响其后续解缠精度造成解算结果偏差。进一步的实例监测结果对比分析表明,PS-InSAR结果给出相位标准差较大区域对应SBAS-InSAR结果显示的非线性变形亦较大。Shi等<sup>[177]</sup>同样发现在非线性沉降明显的区域,使用线性模型几乎无法探测到可用的监测点,而使用其提出的双曲模型作为先验信息则可以较好地还原真实形变结果,如图9所示。

由此可见,某些情况下,在没有先验信息的基础上选择简单线性模型进行分析时,区域性的监测点缺失或许是一种积极的信号,反映了该区域高变形速率或非线性变形的存在,提供了进一步分析的方向。

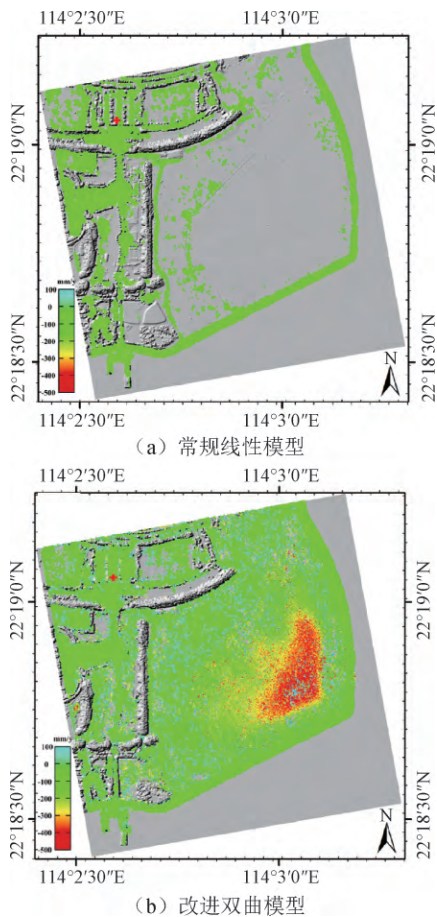


图9 非线性变形引起的区域性监测点缺失  
Fig. 9 Regional loss of monitoring points induced by nonlinear deformation

## 5 结论与展望

系统综述了InSAR技术在房屋建筑安全评估中的研究进展,着重探讨了建筑风险评估指标及其阈值在InSAR监测中的实际应用。通过对建筑风险评估指标及阈值的研究历程、国内外标准规范、评估方法论进行系统分析与对比,得出以下主要结论:

1) 星载InSAR技术具备大范围、可持续、非接触观测优势,实现了由单点离散监测向全域连续感知的转型。与结构理论融合,为广域建筑群轻量化监测与状态评估提供了可行路径。但其在精细化、多尺度建筑变形获取与分析方面,仍受观测一维、低频采样、监测点分布不确定及信号组成复杂等因素限制。

2) 建筑变形作为结构性能与潜在损伤的重要判据,其受多源内外因素驱动且作用机制与影响范围存在差异。星载InSAR技术广域监测能力可实现多尺度建筑群变形机理解译及风险评估,但

需明确建筑变形与地表变形的异质性,实现真实变形信号分离,以提高评估可靠度。

3) 关于建筑允许变形的界定,已形成经验、理论、数值、试验的四维研究体系,但存在评估指标多、阈值设定杂、学科差异明显且缺乏系统性的问题。以InSAR为核心的建筑风险评估研究虽取得进展,但多依赖单一变形数据,忽视建筑物理属性差异且指标阈值主观性强,评估结果仅可反映观测样本集内建筑的相对而非绝对风险程度,方法可迁移性有待完善。

4) 纵观国内外星载InSAR技术及其应用发展历程,国内起步相对滞后,方法论体系成熟度不高,技术效果欠佳且公信力不足,实际工程推广受限。未来需加强跨学科协同,突破遥感InSAR技术与土木工程规范有效对接的理论与技术壁垒,为建立城市长效“体检-更新”机制提供有力保障。

基于现有研究,针对如何提升星载InSAR技术建筑安全评估结果可靠性,提出以下几点可行改进方向:

1) 增强变形数据完备性。针对单一SAR卫星数据源下监测点采样不足和变形反演维度受限等缺陷,融合多源SAR数据及多InSAR子技术协同监测,提升变形数据的完整性与建筑三维变形解译能力。

2) 强化场地数据的应用。结合研究区地质水文特征以界定风险初步研判时的建筑稳定沉降阈值;通过变形数据和环境因子的融合分析,实现建筑变形机理的科学解译与风险的可释性评估。

3) 构建多层次多尺度评估体系。在以单一点位时序变形从广域范围内识别高风险区域或异常变形信号的基础上,引入倾斜、差异沉降等关键评估指标,并综合考虑建筑地基土类别、基础类型、结构类型、体型、年代及用途等建筑变形容忍度影响因素研判建筑风险,形成广域、片区、单体多层次多尺度评估体系。

4) 建立“数据+物理”双驱动评估模型。针对既有评价体系的不确定性及多源影响因子作用的模糊性,层次分析、专家打分、神经网络及易损性曲线等方法已在基于InSAR技术的城市建筑群风险评估得以应用,但仍未突破以数据驱动为核心的评估框架。未来城市建筑群安全管理需构建以结构物理力学模型为约束,多源监测检测及城市环境数据为支持的“数据+物理”双驱动算法大模型,实现房屋建筑全生命周期的智能化动态风险评估预警,推动城市治理从被动响应向前瞻预警转变。

## 参 考 文 献

- [1] 国家统计局. 城镇化率-国家数据[EB/OL]. [2024-03-13]. [https://data.stats.gov.cn/files/html/vchart/vchart\\_001/vchart\\_001.html](https://data.stats.gov.cn/files/html/vchart/vchart_001/vchart_001.html).
- [2] 中华人民共和国应急管理. 第一次全国自然灾害综合风险普查公报[EB/OL]. [2024-05-08]. <https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202405/W020240508313655815475.pdf>.
- [3] 廖睿灵. 给房屋做体检、交养老金、上保险[N/OL]. 人民网·人民日报海外版, 2024-06-20(04). <http://paper.people.com.cn/rmrbhwb/images/2024-06/20/04/rmrbhwb2024062004.pdf>.
- [4] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发全国自建房安全专项整治工作方案的通知[EB/OL]. [2022-05-27]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/27/content\\_5692543.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/27/content_5692543.htm).
- [5] 中共中央办公厅, 国务院办公厅关于推进新型城市基础设施建设打造韧性城市的意见[EB/OL]. [2024-12-05]. [https://www.gov.cn/zhengce/202412/content\\_6991173.htm](https://www.gov.cn/zhengce/202412/content_6991173.htm).
- [6] 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](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202312/content_6918801.htm).
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 一体化推进城市体检和城市更新[EB/OL]. [2025-05-20]. [https://www.mohurd.gov.cn/xinwen/gzdt/art/2025/art\\_82822f6dedb547b798b889521b6466b3.html](https://www.mohurd.gov.cn/xinwen/gzdt/art/2025/art_82822f6dedb547b798b889521b6466b3.html).
- [8] 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, 2025, 42(7): 19-27. (YUE Qingrui, LU Xinzheng, XU Zhen, et al. The “risk source-risk exposure-mitigation force” theoretical framework for urban safety [J]. Engineering Mechanics, 2025, 42 (7) : 19-27. (in Chinese))
- [9] VAKA D S, RAO Y S, BHATTACHARYA A. Time series analysis of the pre-seismic and post-seismic surface deformation of the 2017 Iran-Iraq earthquake derived from Sentinel-1 InSAR data [J]. Journal of Earth System Science, 2023, 132(2): 64.
- [10] NARDÒ S, ASCIONE A, MAZZOLI S, et al. PS-InSAR data analysis: pre-seismic ground deformation in the 2009 L'Aquila earthquake region [J]. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 2020, 61: 41-56.
- [11] XIE Y, ZHU J, FU H, WANG C. A review of underlying topography estimation over forest areas by InSAR: theory, advances, challenges and perspectives [J]. Journal of Central South University, 2020, 27: 997-1011.
- [12] WANG Y, FENG G, LI Z, et al. A strategy for variable-scale InSAR deformation monitoring in a wide area: a case study in the Turpan-Hami Basin, China [J]. Remote Sensing, 2022, 14(15): 3832.
- [13] WANG N, DONG J, WANG Z, et al. Monitoring large-scale hydraulic engineering using Sentinel-1 InSAR: a case study of China's south-to-north water diversion middle route project [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15: 739-750.
- [14] SACRISTÁN M, RUIZ-ARMENTEROS A, LAMAS-FERNÁNDEZ F, et al. MT-InSAR and dam modeling for the comprehensive monitoring of an earth-fill dam: the case of the Benínar Dam (Almería, Spain) [J]. Remote Sensing, 2023, 15(11): 2802.
- [15] HUANG D, QI Z, LIN S, et al. Investigating the structural health of high-rise buildings and its influencing factors using Sentinel-1 synthetic aperture radar imagery: a case study of the Guangzhou-Foshan metropolitan area [J]. Buildings, 2024, 14 (12) : 4074.
- [16] VALENTINI A, TONELLI D, ROCCA A, et al. Satellite InSAR technology for displacements monitoring of bridges: a comparison with onsite topographic measurements and uncertainty quantification [C]//Proceedings of the 14th International Workshop on Structural Health Monitoring. California, USA: Stanford University, 2023:37057.
- [17] 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))
- [18] ROGERS A E E, INGALLS R P. Venus: mapping the surface reflectivity by radar interferometry [J]. Science, 1969, 165(3895): 797-799.
- [19] GRAHAM L C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping [J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(6): 763-768.
- [20] 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.
- [21] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry [J]. Nature, 1993, 364 (6433): 138-142.
- [22] 王霞迎, 赵超英, 尹慧芳. 地表形变时间序列 InSAR 监测法综述[J]. 地球物理学进展, 2018, 33 (4): 1430-1437. (WANG Xiaying, ZHAO Chaoying, YIN Huifang. A review of time-series InSAR monitoring methods for surface deformation [J]. Advances in Geophysics, 2018, 33 (4) : 1430-1437. (in Chinese))

- [23] SANDWELL D T, PRICE E J. Phase gradient approach to stacking interferograms [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103 (B12): 30183-30204.
- [24] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8-20.
- [25] 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.
- [26] GOEL K, ADAM N. A distributed scatterer interferometry approach for precision monitoring of known surface deformation phenomena [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(9): 5454-5468.
- [27] 廖明生, 魏恋欢, 张路. TomoSAR 技术在城市形变监测中的应用[J]. *上海国土资源*, 2013, 34(4): 7-11. (LIAO Mingsheng, WEI Lianhuan, ZHANG Lu. Application of TomoSAR technology in urban deformation monitoring [J]. *Shanghai Land and Resources*, 2013, 34(4): 7-11. (in Chinese))
- [28] 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. New York: IEEE, 1995: 784-786.
- [29] LOMBARDINI F. Differential tomography: A new framework for SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(1): 37-44.
- [30] REALE D, FORNARO G, PAUCIULLO 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.
- [31] ZHU X X, BAMLER R. Let's do the time warp: multicomponent nonlinear motion estimation in differential SAR tomography [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(4): 735-739.
- [32] 建筑变形测量规范: JGJ 8—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. (Code for deformation measurement of building and structure: JGJ 8—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese))
- [33] 赵亿, 钱乐, 杨魁. 探讨 InSAR 技术在城市建筑物沉降监测中的精度[J]. *城市勘测*, 2015(3): 115-119. (ZHAO Yi, QIAN Le, YANG Kui. Discussion on the accuracy of InSAR technology in urban building settlement monitoring [J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2015 (3) : 115-119. (in Chinese))
- [34] YANG K, YAN L, HUANG G, et al. Monitoring building deformation with InSAR: experiments and validation [J]. *Sensors*, 2016, 16(12): 2182.
- [35] DE L S. Partiel funderingsherstel van woningblokken [D]. Delft: Delft University of Technology, 2011.
- [36] VAN W H W. A feasibility study of building monitoring and forensic engineering with interferometric synthetic aperture radar [D]. Delft: Delft University of Technology, 2014.
- [37] 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) : 1816.
- [38] 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.
- [39] MA P, ZHENG Y, ZHANG Z, 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.
- [40] WU S, ZHANG B, DING X, et al. Radar interferometry for urban infrastructure stability monitoring: from techniques to applications [J]. *Sustainability*, 2023, 15(19): 14654.
- [41] 张振海. 建筑物地基沉降的规律与特征分析[J]. *地基处理*, 2021, 3 (5) : 5-12. (ZHANG Zhenhai. Analysis of the patterns and characteristics of building foundation settlement [J]. *Foundation Treatment*, 2021, 3(5): 5-12. (in Chinese))
- [42] 邱明兵. 建筑地基沉降控制与工程实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (QIU Mingbing. Control of building foundation settlement and engineering cases [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese))
- [43] STEFANO M, PINTUCCHI B. A review of research on seismic behaviour of irregular building structures since 2002 [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2008, 6: 285-308.
- [44] 费扬, 陈龙伟. 考虑地基侧向永久位移的钢筋混凝土框架结构地震反应分析[J]. *力学与实践*, 2023, 45 (5) : 1067-1078. (FEI Yang, CHEN Longwei. Seismic response analysis of reinforced concrete frame structure considering permanent lateral displacement of foundation [J]. *Mechanics in Engineering*, 2023, 45 (5): 1067-1078. (in Chinese))
- [45] 陈大川, 曹荣伟, 施楚贤, 等. 某底框结构房屋地基不均匀沉降事故原因及加固处理[J]. *建筑结构*,

- 2015, 45 (9) : 43-47. (CHEN Dachuan, CAO Rongwei, SHI Chuxian, et al. Causes of uneven settlement accidents in a certain base frame structure and reinforcement treatment [J]. Architectural Structure, 2015, 45(9): 43-47. (in Chinese))
- [46] DUNCAN J. Thirteenth bjerrum memorial lecture: a case history of mysterious settlements in a building[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29: 1-10.
- [47] ZHOU A, WANG W, LI N. Building safety risks induced by settlement and its prevention methods[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 29: 299-304.
- [48] YOO J, SON S, KIM S. Development and performance analysis of soil flow protector to reduce soft soil settlement caused by cavity formation [J]. Sustainability, 2020, 12(9): 3641.
- [49] YANG C, JIANG Z. A discrete-time model-based method for predicting settlement of geotechnical foundations in buildings [J]. Mobile Information Systems, 2022(8): 5631634
- [50] DENG J, ZENG T, YUAN S, et al. Interval prediction of building foundation settlement using kernel extreme learning machine [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 939772.
- [51] WEI L. Research on settlement prediction of building foundation in smart city based on BP Network [J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2023, 14(6):876-884.
- [52] HANNA A, CHEN W. Response of multistory steel structure subjected to differential settlements of its foundation [J]. International Journal of Structural Integrity, 2021, 13(4): 594-610.
- [53] JIAO C-J, YOU S, JI H-G. Numerical analysis of building structures response under effect of continuous and stepped non-uniform settlement [J]. Journal of Central South University, 2023, 30(12): 4066-4081.
- [54] NASER M, HAWILEH R. Predicting the response of continuous RC deep beams under varying levels of differential settlement [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2018, 13: 686-700.
- [55] PENG S. Surface subsidence engineering [M]. New York: SME, 1992.
- [56] 崔希民, 张兵, 彭超. 建筑物采动损害评价研究现状与进展[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1718-1728. (CUI Ximin, ZHANG Bing, PENG Chao. Current status and progress on the estimation of mining-induced building damage [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1718-1728. (in Chinese))
- [57] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground [C]// Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. London: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1969: 225-290.
- [58] 阎跃观, 师晓波, 刘吉波, 等. 矿区地表与建(构)筑物移动变形关系实测研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48 (10) : 158-165. (YAN Yueguan, SHI Xiaobo, LIU Jibo, et al. In-site monitoring study on relationship between movement and deformation of surface and buildings in mining area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 (10) : 158-165. (in Chinese))
- [59] DECK O, HEIB M A, HOMAND F. Taking the soil-structure interaction into account in assessing the loading of a structure in a mining subsidence area[J]. Engineering Structures, 2003, 25: 435-448.
- [60] POTTS D M, ADDENBROOKE T I. A structure's influence on tunnelling-induced ground movements [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 1997, 125(2): 109-125.
- [61] DECK O, SINGH A. Analytical model for the prediction of building deflections induced by ground movements [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2012, 36 (1): 62-84.
- [62] LI Y, YANG K, ZHANG J, 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.
- [63] GIARDINA G, MILILLO P, DEJONG M J, et al. Evaluation of InSAR monitoring data for post-tunnelling settlement damage assessment [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, 26(2): e2285.
- [64] 国家安全监管总局, 国家煤矿安监局, 国家能源局, 等. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017. (State Administration of Work Safety, National Coal Mine Safety Administration, National Energy Administration, et al. Regulations on the setting of coal pillars and coal mining under buildings, water bodies, railways and main roadways [S]. Beijing: Coal Industry Press, 2017. (in Chinese))
- [65] 崔希民, 车宇航, 赵玉玲, 等. 采动地表移动变形与建筑物损坏程度评价的再认识[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 145-153. (CUI Ximin, CHE Yuhang, ZHAO Yuling, et al. Re-understanding of surface movement and deformation and building damage degree evaluation in mining areas [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 145-153. (in Chinese))
- [66] TAY C, LINDSEY E O, CHIN S T, et al. Sea-level rise from land subsidence in major coastal cities [J]. Nature Sustainability, 2022, 5(12): 1049-1057.
- [67] AO Z, HU X, TAO S, et al. A national-scale assessment of land subsidence in China's major cities [J]. Science, 2024, 384(6693): 301-306.
- [68] SOLANO R D, WDOWINSKI S, CABRAL C E, et al.

- Detecting differential ground displacements of civil structures in fast-subsiding metropolises with interferometric SAR and band-pass filtering [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 15460.
- [69] WANG R, YANG M, YANG T, et al. Decomposing and mapping different scales of land subsidence over Shanghai with X-and C-Band SAR data stacks [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2022, 15(1): 478-502.
- [70] 梁光河, 杨巍然. 从南大西洋裂解过程解密大陆漂移的驱动力[J]. *地学前缘*, 2022, 29(01): 316-341. (LIANG Guanghe, YANG Weiran. Decipher the driving force in continental drift from new insights about the South Atlantic breakup process [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(1): 316-327. (in Chinese))
- [71] 林旭川. 城市建筑群地震灾害数值仿真与风险控制[J]. *城市与减灾*, 2017(3): 18-22. (LIN Xuchuan. Numerical simulation and risk control of seismic disasters in urban building clusters [J]. *City and Disaster Reduction*, 2017(3): 18-22. (in Chinese))
- [72] LU X, MCKENNA F, CHENG Q, et al. An open-source framework for regional earthquake loss estimation using the city-scale nonlinear time history analysis [J]. *Earthquake Spectra*, 2020, 36(2): 806-831.
- [73] 于贵华, 徐锡伟, 陈桂华, 等. 汶川 8.0 级地震地表变形局部化样式与建筑物破坏特征关系初步研究[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(12): 3027-3041. (YU Guihua, XU Xiwei, CHEN Guihua, et al. Preliminary study on the relationship between localized surface deformation patterns and building damage characteristics in the Wenchuan M8.0 earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(12): 3027-3041. (in Chinese))
- [74] 谭莎莎, 杨莹辉, 许强, 等. 2025 年 1 月 7 日西藏定日县 M<sub>s</sub> 6.8 级强震地表同震形变特征与房屋建筑震损分析[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2025, 52(2): 212-222. (TAN Shasha, YANG Yinghui, XU Qiang, et al. Coseismic deformation and seismic damage assessment of buildings from the MS 6.8 earthquake in Dingri, Xizang, on January 7, 2025 [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 52(2): 212-222.
- [75] PLANK S. Rapid damage assessment by means of multi-temporal SAR: a comprehensive review and outlook to Sentinel-1 [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(6): 4870-4906.
- [76] 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: 112508.
- [77] 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.
- [78] MEYERHOF G G. The settlement analysis of building frames [J]. *The Structural Engineer*, 1947, 25(9): 369-409.
- [79] SKEMPTON A W, MACDONALD D H. The allowable settlements of buildings [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1956, 5(6): 727-768.
- [80] SOWERS G F. *Shallow foundation: chapter 6* [M]. New York: McGraw-Hill, 1962: 525-641.
- [81] TERZAGHI K, PECK R B. *Soil mechanics in engineering practice* [M]. 2nd ed. New York: John Wiley, 1967.
- [82] POULOS H G, CARTER J P, SMALL J C. *Foundations and retaining structures-research and practice* [C]// 15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Istanbul, Turkey: Balkema, 2002: 2527-2606.
- [83] CODUTO D P. *Foundation design: principles and practices* [M]. London: Pearson Education Limited, 2014.
- [84] TERZAGHI C. Settlement of structures in Europe and methods of observation [J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1938, 103(1): 1432-1448.
- [85] *Building code requirements for reinforced concrete: ACI 318-89* [S]. Detroit, MI: American Concrete Institute, 1992.
- [86] *Eurocode 7: geotechnical design: EN 1997-1-2004* [S]. European Committee for Standardization, 2004.
- [87] POLSHIN D E, TOKAR R A. Maximum allowable non-uniform settlement of structures [C]//4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. London, England: Butterworth's Scientific, 1957: 402-405.
- [88] ANG T L, MASRI K J. Behaviour of residential structures on problematic ground [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Langkawi, Malaysia: IOP Publishing, 2019: 012010.
- [89] GRANT R, CHRISTIAN John T, VANMARCKE Erik H. Differential settlement of buildings [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1974, 100(9): 973-991.
- [90] BURLAND J, WROTH C. Settlement of buildings and associated damage [C]// Proceedings of the Conference on Settlement of Structures. London, England: Pentech Press, 1974: 611-654.
- [91] MEYERHOF G G. Limit states design in geotechnical engineering [J]. *Structural Safety*, 1982, 1(1): 67-71.
- [92] BJERRUM L. Discussion [C]// Proceedings of

- European Conference on Soil Mechanics 2nd Foundation Engineering. Oslo, Norway: Norwegian Geotechnical Institute, 1963: 1-3.
- [93] ZHANG L, NG A M Y. Limiting tolerable settlement and angular distortion for building foundations [J]. Probabilistic Applications in Geotechnical Engineering, 2007: 1-11.
- [94] CHARLES J A, SKINNER H D. Settlement and tilt of low-rise buildings[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2004, 157 (2): 65-75.
- [95] NAMAZI E, MOHAMAD H. Potential damage assessment in buildings undergoing tilt [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2013, 166(4): 365-375.
- [96] BURLAND J, BROMS B, MELLO V. Behaviour of foundations and structures [C]// 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. London: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1977: 495-546.
- [97] RANKIN W J. Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects [C]//Engineering Geology Special Publications. London: Geological Society, 1988: 79-92.
- [98] BOSCARDIN Marco D, CORDING Edward J. Building response to excavation-induced settlement [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115 (1): 1-21.
- [99] SCHUSTER M, KUNG G T C, JUANG C H, et al. Simplified model for evaluating damage potential of buildings adjacent to a braced excavation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12): 1823-1835.
- [100] DAY Robert W, BOONE Storer J. Discussion and closure: ground-movement-related building damage [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(5): 462-465.
- [101] FINNO R J, VOSS FRANK Jr. Evaluating damage potential in buildings affected by excavations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(10): 1199-1210
- [102] NAMAZI Eshagh, MOHAMAD Hisham. Assessment of building damage induced by three-dimensional ground movements [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2013, 139 (4) : 608-618.
- [103] BURLAND J B. Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavations [C]// 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Tokyo, Japan: Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1995: 1189-1202.
- [104] SON Moorak, CORDING Edward J. Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131 (2) : 162-177.
- [105] NEGULESCU C, FOERSTER E. Parametric studies and quantitative assessment of the vulnerability of a RC frame building exposed to differential settlements [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2010, 10 (9): 1781-1792.
- [106] 李道. 不同不均匀基础沉降形式对框架结构影响的有限元分析[J]. 中外建筑, 2016 (5): 161-163. (LI Yi. Finite element analysis of the influence of different uneven foundation settlement forms on frame structures [J]. Architecture in China & Foreign Countries, 2016 (5): 161-163. (in Chinese))
- [107] CHEN H, GUO Y, ALQAWZAI S, et al. Study on uneven settlement and correction of steel frame structures based on numerical simulation method [J]. Plos One, 2024, 19(5): e0303249.
- [108] PANDE G N, MIDDLETON J, LEE J S, et al. Numerical simulation of cracking and collapse of masonry panels subject to lateral loading [C]// Proceeding of 10th International Block/Brick Masonry Conference. Calgary, Canada: International Masonry Society, 1994: 107-115.
- [109] 赵欣. 不均匀沉降对砌体结构的影响分析[D]. 济南: 济南大学, 2014. (ZHAO Xin. Analysis of the impact of uneven settlement on masonry structures [D]. Jinan: University of Jinan, 2014. (in Chinese))
- [110] 吴文斌. 盾构隧道下穿既有砖混结构的变形影响及其破损评估[D]. 长沙: 湖南大学, 2018. (WU Wenbin. Deformation influence and damage assessment of shield tunneling underpassing existing brick-concrete structures [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese))
- [111] DONG Z, WU G, ZHU H, et al. Mechanism and control of the long-term performance evolution of structures [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2020, 14(5): 1039-1048.
- [112] 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (Code for design of building foundation: GB 50007—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese))
- [113] 北京地区建筑地基基础勘察设计规范: DBJ11 501—2009[S]. 2016版. 北京: 北京市规划委员会, 2017. (Code for geotechnical investigation and design of building foundations in Beijing area: DBJ11 501—2009[S]. 2016 ed. Beijing: Beijing Municipal Bureau of Urban Planning, 2017. (in Chinese))
- [114] 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))
- [115] Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures: ASCE/SEI 7-16 [S]. Reston, USA: American Society of Civil Engineers, 2016.
- [116] Engineering and design settlement analysis: EM 1110-1-1904 [M]. Washington, DC: Department of the Army U. S. Army Corps of Engineers, 1990.
- [117] Residential slabs and footings: AS2870-2011 [S]. Sydney, NSW: the Council of Standards Australia, 2011.
- [118] Foundation engineering manual [S]. 5th ed. Vancouver, BC: Canadian Geotechnical Society, 2023.
- [119] Funderingen onder gebouwen [S]. Nederland: Kennis Centrum Aanpak Funderingsproblematiek, 2022.
- [120] Framework on performance based impact assessment associated with ERSS and tunnelling works [S]. Singapore: Building and Construction Authority, 2021.
- [121] Code of practice for foundations 2017 [S]. Hong Kong, China: Buildings Department, 2017.
- [122] 程季达. 房屋和工业结构物天然地基设计标准及技术规范 HNTY127-55 [M]. 北京: 建筑工程出版社, 1957. (CHENG Jida. Design standards and technical specifications for natural foundations of buildings and industrial structures (HNTY127-55) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1957. (in Chinese))
- [123] 城市轨道交通工程监测技术规范: GB 50911—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. (Code for monitoring measurement of urban rail transit engineering: GB 50911—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese))
- [124] 民用建筑可靠性鉴定标准: GB 50292—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (Standard for appraisal of reliability of civil buildings: GB 50292—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese))
- [125] 工业建筑可靠性鉴定标准: GB 50144—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. (Standard for appraisal of reliability of industrial building structures: GB 50144—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese))
- [126] 建筑基坑工程监测技术规范: GB 50497—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Technical specification for monitoring of building foundation pit engineering: GB 50497—2019 [S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2019. (in Chinese))
- [127] 时间序列 InSAR 地表形变监测数据处理规范: CH/T 6006—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. (Specification of time series InSAR data processing foreground deformation monitoring: CH/T 6006—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese))
- [128] 基于 InSAR 技术的地壳形变监测规范: GB/T 44146—2024 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2024. (Specification for crustal deformation monitoring based on InSAR technology: GB/T 44146—2024 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2024. (in Chinese))
- [129] Geographic information-imagery sensor models for geopositioning: ISO/TS 19130-2: 2014 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2014.
- [130] Geographic information-Calibration and validation of remote sensing imagery sensors and data: ISO/TS 19159-3: 2018 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.
- [131] InSAR 沉降监测预警规范: T/SZEMA 0002-2023 [S]. 深圳: 深圳市应急管理联合会, 2023. (Code for InSAR settlement monitoring and early warning: T/SZEMA 0002-2023 [S]. Shenzhen: Shenzhen Emergency Management Association, 2023. (in Chinese))
- [132] 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. (Technical specification for monitoring of building safety by spaceborne interferometric synthetic aperture radar: T/CECS 1165—2022 [S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2022. (in Chinese))
- [133] FERRETTI A, FERRUCCI F, PRATI C, et al. SAR analysis of building collapse by means of the permanent scatterers technique [C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway: IEEE, 2000: 3219-3221.
- [134] DIAO X, WU K, CHEN R, et al. Identifying the cause of abnormal building damage in mining subsidence areas using InSAR technology [J]. IEEE Access, 2019, 7: 172296-172304.
- [135] 周云, 陈嘉豪, 易伟建, 等. 某砌体结构房屋倒塌事故分析与倒塌全过程仿真模拟 [J]. 土木工程学报, 2024, 58(7): 14-27. (ZHOU Yun, CHEN Jiahao, YI Weijian, et al. Analysis and simulation of the collapse process of a masonry structure house [J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 58 (7) : 14-27. (in Chinese))
- [136] RODRÍGUEZ A I, MARTÍNEZ S 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.
- [137] KUZU R S, BAGAGLINI L, WANG Y, et al. Automatic detection of building displacements through unsupervised learning from InSAR data [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2023, 16: 6931-6947.

- [138] RASPINI F, BIANCHINI S, CIAMPALINI A, et al. Continuous, semi-automatic monitoring of ground deformation using Sentinel-1 satellites [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 7253.
- [139] CASCINI L, FERLISI S, FORNARO G, et al. Subsidence monitoring in Sarno urban area via multi-temporal DInSAR technique [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(8): 1709-1716.
- [140] CABRAL C E, OSMANOGLU B, DIXON T, et al. Subsidence and fault hazard maps using PSI and permanent GPS networks in central Mexico [J]. *IAHS-AISH Publication*, 2010, 339: 255-259.
- [141] BARRA A, REYES C C, HERRERA G, et al. From satellite interferometry displacements to potential damage maps: a tool for risk reduction and urban planning [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 282: 113294.
- [142] 左世诚, 董杰, 廖明生. 时序 InSAR 形变梯度估计与城市建筑物风险评估: 以北京平原为例 [J]. *地质科技通报*, 2024, 43(6): 171-183. (ZUO Shicheng, DONG Jie, LIAO Mingsheng. Time-series InSAR deformation gradient estimation and urban buildings risk assessment: a case study in the Beijing Plain [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024, 43(6): 171-183. (in Chinese))
- [143] HORN B K P. Hill shading and the reflectance map [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1981, 69(1): 14-47.
- [144] CABRAL C E, DÍAZ M O, DELGADO G H. Subsistencia y sus mapas de peligro: un ejemplo en el área nororiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México [J]. *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana*, 2011, 63(1): 53-60.
- [145] SANABRIA M P, GUARDIOLA A C, TOMÁS R, et al. Subsidence activity maps derived from DInSAR data: orihuela case study [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, 14(5): 1341-1360.
- [146] CIGNA F, TAPETE D. Present-day land subsidence rates, surface faulting hazard and risk in Mexico City with 2014-2020 Sentinel-1 IW InSAR [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 253: 112161.
- [147] SHAHBAZI S, BARRA A, GAO Q, et al. Detection of buildings with potential damage using differential deformation maps [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2024, 218: 57-69.
- [148] DROUGKAS A, VERSTRYNGE E, VAN Balen K, et al. Country-scale InSAR monitoring for settlement and uplift damage calculation in architectural heritage structures [J]. *Structural Health Monitoring*, 2021, 20(5): 2317-2336.
- [149] 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): 3467.
- [150] FRANGOPOL D M, SAYDAM D, KIM S. Maintenance, management, life-cycle design and performance of structures and infrastructures: a brief review [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2012, 8(1): 1-25.
- [151] 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]// *Proceedings of the SPIE 9642, SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XV*. Toulouse, France: SPIE, 2015: 108-116.
- [152] 费毕刚, 韩鹏飞, 朱茂, 等. 基于星载 InSAR 技术的城市房屋安全风险识别 [J]. *城市勘测*, 2021(3): 71-76. (FEI Bigang, HAN Pengfei, ZHU Mao, et al. Urban house safety risk identification based on satellite insar technology [J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2021(3): 71-76. (in Chinese))
- [153] 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. Settlement monitoring and safety assessment of building complex in M mine area based on SBAS-InSAR technology [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(3): 175-183. (in Chinese))
- [154] 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*, 2023, 13(24): 13063.
- [155] 地质灾害危险性评估规范: GB/T 40112—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. (Specifications for risk assessment of geological hazard: GB/T 40112—2021 [S]. Beijing: China Standards Press, 2021. (in Chinese))
- [156] XU J, GU S, LI J J, et al. Monitoring and risk assessment of urban surface deformation based on PS-InSAR technology: a case study of Nanjing city [J]. *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, 2024, 5(2): 73-78.
- [157] 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))
- [158] 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.
- [159] WANG Y, FENG G, LI Z, et al. A multi-frame

- deformation velocity splicing method for wide-area InSAR measurement based on uncontrolled block adjustment: a case study of long-term deformation monitoring in Guangdong, China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 301: 113929.
- [160] HANSEN R F. Radar interferometry: data interpretation and error analysis [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001.
- [161] 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.
- [162] KUAI H, MACCHIARULO V, SHARMA S, et al. MT-InSAR optimisation for structural health monitoring [C]// *European on Structural Health Monitoring*. Potsdam: German Society for Non-Destructive Testing, 2024: 29753.
- [163] 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]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1643-1660. (in Chinese))
- [164] 廖明生, 王茹, 杨梦诗, 等. 城市目标动态监测中的时序 InSAR 分析方法及应用 [J]. *雷达学报*, 2020, 9(3): 409-424. (LIAO Mingsheng, WANG Ru, YANG Mengshi, et al. Techniques and applications of spaceborne time-series InSAR in urban dynamic monitoring [J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(3): 409-424. (in Chinese))
- [165] HU J, LI Z W, DING X L, et al. Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: a review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 133: 1-17.
- [166] BALZ T, WEI L, JENDRYKE M, et al. TomoSAR and PS-InSAR analysis of high-rise buildings in Berlin [C]// 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. New York: IEEE, 2012: 447-450.
- [167] 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.
- [168] SHI G, LIN H, MA P. A Hybrid method for stability monitoring in low-coherence urban regions using persistent and distributed scatterers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(10): 3811-3821.
- [169] ZHANG Y, KANG Y, WEI J, et al. SAR interferometry on full scatterers: mapping ground deformation with ultra-high density from space [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 302: 113965.
- [170] 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*, 2021, 10(1): 207-230.
- [171] REN T, GONG W, GAO L, et al. An interpretation approach of ascending-descending SAR data for landslide identification [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): 1299.
- [172] WANG Guijie, WANG Yunlong, ZANG Xisheng, et al. Locating and monitoring of landslides based on small baseline subset interferometric synthetic aperture radar [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2019, 13(4): 044528.
- [173] BOVENGA F, WASOWSKI J, NITTI D O, et al. Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 119: 272-285.
- [174] WANG G, DENG K, CHEN Q, et al. Distributed scatterer processing based on binary partition trees with multi-baseline PolInSAR data [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5367.
- [175] 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.
- [176] YAN Y, DOIN M P, LOPEZ-QUIROZ P, et al. Mexico City subsidence measured by InSAR time series: joint analysis using PS and SBAS approaches [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(4): 1312-1326.
- [177] SHI G, LIN H, BÜRGMANN R, et al. Early soil consolidation from magnetic extensometers and full resolution SAR interferometry over highly decorrelated reclaimed lands [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111231.