

学校代号 10532
分类号 TU196

学 号 S2201W0100
密 级 公开



湖南大学
HUNAN UNIVERSITY

硕士学位论文

基于星载 InSAR 技术的城市建筑群结 构安全风险监测研究

学位申请人姓名 陈建炜

培 养 单 位 土木工程学院

导师姓名及职称 周云教授 谈忠坤教授级高工

学 科 专 业 土木水利

研 究 方 向 结构健康监测

论文提交日期 2025年5月19日

学校代号：10532

学 号：S2201W0100

密 级：公开

湖南大学硕士学位论文

基于星载 InSAR 技术的城市建筑群结构安全风险监测研究

国家自然科学基金（52278306）

湖南省重点研发计划（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）

湖南省应急管理厅科技项目（yjtkjxm_202406）

学位申请人姓名：陈建炜

导师姓名及职称：周云教授 谈忠坤教授级高工

培 养 单 位：土木工程学院

专 业 名 称：土木水利

论文提交日期：2025年5月19日

论文答辩日期：2025年5月21日

答辩委员会主席：黄远教授

Research on Structural Safety Risk Monitoring of Urban Building
Clusters Based on Spaceborne InSAR Technology

by

Chen Jianwei

B.E. (Huaqiao University)2022

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Civil and Hydraulic

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisor


Professor ZHOU Yun, Senior Engineer TAN Zhongkun

May, 2025

湖南大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：

日期：2025年5月21日


学位论文版权使用授权书

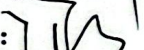
本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

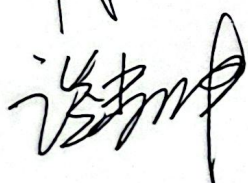
本学位论文属于

- 1、保密□，在____年解密后适用本授权书。
- 2、不保密。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：日期：2025年5月21日

导师签名：日期：2025年5月21日



摘 要

改革开放以来,我国经历了快速的城市化进程,大量建筑使用年限达到设计年限的中后期。伴随时间的推移,我国存量建筑及老旧小区日渐增多,在结构老化、不利地质条件、不规范工程施工等不利因素的综合影响下,建筑安全隐患不断增大,阻碍了城市的安全发展进程。近年来,我国建筑安全事故多发,建筑风险监测预警愈发受到社会关注。为响应国家城市安全发展的重大需求,同时考虑异常变形往往是城市建筑风险加剧及倒塌事故发生的必要条件,本文将变形监测作为重点,在星载(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术监测基础上深化土木工程理论分析,目的在于为城市大范围建筑群提出低成本、高效率、可持续的变形监测及风险评估方法。本文的主要研究内容如下:

(1)系统梳理现有星载InSAR技术的研究应用现状,针对建筑变形监测这一特定应用场景,对相位估计、测点筛选、参考点选取等技术环节进行优化,提高建筑变形监测结果准确性。具体包括:本文系统考究各类InSAR技术在建筑监测中的特点,重点论述永久散射体干涉测量(Persistent Scatterer Interferometry, PSI)技术在建筑监测中的应用情况;归纳常用于建筑变形监测的SAR卫星系统,阐述星载InSAR技术干涉几何原理,论证PSI技术在建筑变形监测与风险评估的精度与可靠性;采用多重阈值筛选建筑PS点,引入包含温度相位的干涉相位模型及可靠温度数据反演建筑结构变形;针对复杂建筑环境,利用结构变形先验信息,提出建筑变形反演参考点优化选取方法。

(2)系统分析低层浅基础建筑的变形模式,基于PSI技术获取的多尺度建筑变形监测结果,提出建筑综合风险评估体系,提高现有风险评估方法的可靠性。具体包括:系统性归纳低层浅基础建筑在纵向和横向上的变形模式;在城市级广域尺度上,基于PSI技术和城市大数据的融合,开展大范围变形场校验与解析;在区域尺度上,提出基于温度变形剔除的反距离权重插值法(Inverse Distance Weight, IDW)构建精细化异常变形场;在单体建筑尺度上,基于建筑结构理论分析,区分建筑整体变形风险与结构损伤风险,提出更加全面的单体建筑风险评估指标体系及风险评估公式;最后,以中国台北市为例开展验证性研究。结果表明,所提方法有利于提高基于PSI技术开展建筑风险评估的可靠性。

(3)系统分析高层建筑的变形模式,提出建筑温度相关变形系数的概念及计算方法,通过系数的趋势分析克服温度变形干扰,提高建筑异常变形识别效率。具体包括:从SAR卫星的独特视角出发,系统归纳高层建筑典型变形模式;利用一栋高层建筑上GPS传感器记录的历史变形数据,验证PSI技术获取高层建筑变形的可靠性;充分分析高层建筑多种变形分量特征,结合建筑结构理论,提出温度

相关变形系数的概念及算法；提出基于温度相关变形系数演化趋势的高层建筑异常变形识别及量化方法；最后，以长沙市高层建筑变形监测为例，验证所提方法的可靠性。结果表明，所提方法有利于从毫米级尺度深入分析高层建筑结构变形模式，并识别高层建筑结构的异常变形。

本文充分挖掘星载InSAR技术的优势，与建筑结构理论结合提出建筑异常变形识别及风险评估方法，有望加速星载InSAR技术在工程实际中的推广应用，并助力未来“城市体检”的实现，提高城市建筑群安全风险预警水平。

关键词：结构健康监测；永久散射体干涉测量；建筑变形模式；温度变形；风险评估

Abstract

Since the implementation of reform and opening-up, China has undergone rapid urbanization, with a large number of buildings now entering the mid-to-late stages of their designed service life. Over time, the increasing stock of aging buildings and old residential communities, combined with structural deterioration, adverse geological conditions, and substandard construction practices, has led to growing building safety hazards, hindering urban safety development. In recent years, frequent building-related accidents in China have heightened societal concerns regarding structural risk monitoring and early warning. In response to the national demand for urban safety development and considering that abnormal deformation is often a prerequisite for escalating structural risks and potential collapse incidents, this study focuses on deformation monitoring. Building upon spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technology, we integrate civil engineering theoretical analysis to develop a low-cost, high-efficiency, and sustainable approach for large-scale urban building deformation monitoring and risk assessment. The main research contents of this paper are as follows:

(1) This study systematically reviews the current research status and practical applications of spaceborne interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology. With a specific focus on building deformation monitoring applications, we present methodological optimizations for critical technical components including phase estimation, coherent target selection, and reference point determination. These refinements collectively contribute to improved accuracy in structural deformation monitoring. The specific research contents include the following aspects: (i) systematically investigating the characteristics of various InSAR techniques for structural monitoring, with particular focus on the application of Persistent Scatterer Interferometry (PSI) in building surveillance; (ii) reviewing commonly used SAR satellite systems for building deformation monitoring while elucidating the interferometric geometric principles of spaceborne InSAR technology and evaluating the accuracy and reliability of PSI in deformation monitoring and risk assessment; (iii) developing a multi-threshold approach for PS point selection and establishing an interferometric phase model incorporating thermal-phase components with reliable temperature data for structural deformation inversion; and (iv) proposing an optimized

reference point selection method for deformation inversion in complex urban environments by utilizing a priori knowledge of structural deformation patterns.

(2) This study systematically analyzes deformation patterns of low-rise shallow-foundation buildings and develops a comprehensive risk assessment framework based on multi-scale deformation monitoring results obtained from PSI technology, thereby enhancing the reliability of existing risk evaluation methods. The specific contributions include: (i) systematic classification of vertical and horizontal deformation modes for low-rise shallow-foundation buildings; (ii) city-wide validation and analysis of deformation fields through integration of PSI technology and urban big data; (iii) development of a refined abnormal deformation field construction method using temperature-corrected Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation at regional scale; (iv) establishment of a comprehensive risk assessment system with differentiated evaluation indicators and quantitative formulas distinguishing between whole-building deformation risk and structural damage risk at individual building scale; and (v) experimental validation through case studies in Taipei, China. The results demonstrate significant improvement in the reliability of PSI-based building risk assessment.

(3) This study systematically analyzes deformation patterns of high-rise buildings and proposes the concept of temperature-related deformation coefficients along with their computational methodology. By analyzing coefficient trends, the approach effectively mitigates thermal deformation interference and enhances abnormal deformation detection. The specific contributions include: (i) systematic classification of typical high-rise building deformation patterns from the unique perspective of SAR satellite observations; (ii) validation of PSI technology's reliability for high-rise deformation monitoring using historical GPS sensor data from a representative building; (iii) comprehensive analysis of multiple deformation components and development of temperature-related deformation coefficient algorithms based on structural theory; (iv) proposal of an anomaly identification and quantification method using evolutionary trends of temperature-related deformation coefficients; and (v) experimental validation through high-rise building monitoring case studies in Changsha, China. Results demonstrate the method's effectiveness for millimeter-scale structural deformation pattern analysis and abnormal deformation identification in high-rise structures.

Building upon the inherent advantages of spaceborne InSAR technology, this study develops an integrated framework for structural anomaly detection and risk assessment through synergistic coupling with architectural mechanics principles. The proposed methodology demonstrates significant potential to facilitate broader adoption

of InSAR technology in practical engineering applications, advance future urban infrastructure health monitoring initiatives, and enhance early-warning capabilities for structural safety risks across metropolitan building inventories.

Key words: Structural health monitoring; Persistent scatterer interferometry; Building deformation patterns; Temperature deformation; Risk assessment

目 录

学位论文原创性声明	I
摘 要	II
ABSTRACT	IV
插图索引	X
附表索引	XII
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及选题意义	1
1.2 InSAR 技术研究进展	3
1.3 时序 InSAR 技术在建筑变形监测领域应用研究现状	5
1.3.1 建筑变形测点密度与观测精度	6
1.3.2 以异常识别为目标的建筑变形监测	8
1.3.3 基于时空分析的建筑风险评估	10
1.3.4 与结构理论结合的建筑风险评估	12
1.4 本文研究内容	13
第 2 章 星载 InSAR 变形监测技术基本原理	15
2.1 引言	15
2.2 SAR 卫星系统	15
2.3 星载 InSAR 技术概述	17
2.3.1 InSAR 技术基本原理	16
2.3.2 PSI 变形监测技术	19
2.4 建筑 PSI 变形监测方法	21
2.4.1 PS 点选取方法	21
2.4.2 大气温度数据选取	22
2.4.3 参考点选取与变形分解	23
2.5 本章小结	24
第 3 章 建筑异常变形识别与风险评估方法	25
3.1 引言	25
3.2 低层建筑群异常变形监测与风险评估方法	25
3.2.1 多尺度建筑变形监测方法	25
3.2.2 基于温度变形剔除的 IDW 插值法	27
3.2.3 低层建筑变形模式分析	28
3.2.4 低层建筑风险评估方法	30

3.3 基于温度相关变形系数的高层建筑异常变形识别方法	31
3.3.1 高层建筑变形监测方法	31
3.3.2 高层建筑典型变形模式	32
3.3.3 温度相关变形系数及异常变形识别	36
3.4 本章小结	39
第 4 章 低层建筑群变形监测与风险评估	40
4.1 引言	40
4.2 研究区域与数据处理	40
4.2.1 台北市与数据概况	40
4.2.2 SAR 影像处理	41
4.3 城市级广域尺度变形场分析	42
4.3.1 台北市广域变形结果与验证	42
4.3.2 地下水位与 PSI 变形结果对比	44
4.4 片区级中域尺度异常变形场分析	44
4.4.1 风险区域概况	44
4.4.2 精细化变形场分析	46
4.5 建筑级局域尺度变形分析与风险评估	52
4.5.1 风险建筑概况	52
4.5.2 建筑变形分析	53
4.5.3 建筑风险评估	56
4.6 本章小结	57
第 5 章 高层建筑变形监测与异常变形识别	58
5.1 引言	58
5.2 温度与变形监测精度校验	58
5.2.1 温度数据校验	58
5.2.2 变形结果校验	59
5.3 建筑变形模式识别	61
5.3.1 研究区域与建筑信息	61
5.3.2 变形模式 I 建筑	62
5.3.3 变形模式 II 建筑	64
5.3.4 变形模式 III 建筑	66
5.4 建筑变形模式分析	67
5.4.1 建筑 I 复杂变形分析	67
5.4.2 建筑变形对比分析	68
5.5 高分辨率影像监测对比	69

5.6 本章小结	72
结论与展望	73
参考文献	75
致 谢	89
附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文	90
附录 B SAR 卫星影像信息	91

插图索引

图 1.1	近年我国建筑事故	2
图 1.2	SAR 卫星观测示意图	4
图 1.3	InSAR 技术识别建筑测点	6
图 1.4	建筑自身特性诱发变形	9
图 1.5	研究内容	14
图 2.1	Sentinel-1 卫星	16
图 2.2	干涉几何示意图	18
图 2.3	相位解缠示意图	18
图 2.4	PSI 技术流程	20
图 2.5	SAR 卫星升降轨观测示意图	24
图 3.1	低层建筑群多尺度监测方法研究概念	26
图 3.2	低层浅基础建筑群多尺度监测方法流程	26
图 3.3	IDW 插值法平面示意图	27
图 3.4	浅基础低层建筑沉降模式	28
图 3.5	建筑横倾模式量化示意图	29
图 3.6	建筑风险评估指标	31
图 3.7	高层建筑异常变形识别流程	32
图 3.8	高层建筑卫星观测示意图	33
图 3.9	高层建筑变形模式 I	34
图 3.10	高层建筑变形模式 II	35
图 3.11	高层建筑变形模式 III	36
图 3.12	平面刚度无穷大示意图	37
图 3.13	简化情况下温度相关变形系数计算步骤	37
图 3.14	改进的温度相关变形系计算步骤	38
图 4.1	台北市地形与卫星观测示意图	41
图 4.2	台北市影像子集	42
图 4.3	台北市广域变形场	43
图 4.4	PSI 与 GNSS 的变形结果对比	44
图 4.5	LOS 向变形与地下水位对比结果	45
图 4.6	风险区域概况	46
图 4.7	风险区域东西向变形场	47
图 4.8	变形场演化过程	49

图 4.9	路面裂缝实景	51
图 4.10	风险区域沉降剖面	51
图 4.11	研究建筑实景	52
图 4.12	建筑 B1、B2 开裂与沉降情况	53
图 4.13	建筑纵向沉降曲线	54
图 4.14	建筑局部横倾角曲线	55
图 4.15	建筑结构风险评估结果	56
图 5.1	长沙市温度传感器安装位置	59
图 5.2	温度数据验证结果	59
图 5.3	昆仑公寓卫星观测示意图	60
图 5.4	PSI 与 GPS 变形结果对比	60
图 5.5	长沙市研究区域平均振幅影像	61
图 5.6	PS 点分布	62
图 5.7	建筑 A 变形识别结果	63
图 5.8	建筑 B 变形识别结果	64
图 5.9	建筑 C 变形识别结果	64
图 5.10	建筑 D 变形识别结果	65
图 5.11	建筑 E 变形识别结果	65
图 5.12	建筑 F 变形识别结果	66
图 5.13	建筑 G 变形识别结果	66
图 5.14	建筑 H 变形识别结果	67
图 5.15	建筑 I 变形识别结果	67
图 5.16	建筑 I 复杂变形模式分析	68
图 5.17	CSK 影像 PS 点结果	70
图 5.18	建筑顶端变形对比	72

附表索引

表 1.1	传统建筑变形监测方法	2
表 1.2	InSAR 技术特性统计	5
表 1.3	InSAR 技术建筑变形观测精度研究	7
表 1.4	不同诱因下的建筑变形特征	10
表 2.1	常用于建筑变形监测的 SAR 卫星系统	16
表 3.1	建筑沉降模式	29
表 3.2	建筑横倾模式	30
表 3.3	风险评估指标占比	31
表 4.1	大数据概况	41
表 4.2	GNSS 测站信息	43
表 4.3	地下水位测站信息	44
表 4.4	沉降场特征统计	50
表 4.5	沉降剖面特征统计	52
表 4.6	建筑信息	53
表 4.7	建筑沉降变形结果	55
表 4.8	建筑横倾结果	56
表 5.1	高层建筑信息	63
表 5.2	长沙高层建筑变形结果	69
表 B.1	影像集 SET-A1 信息	91
表 B.2	影像集 SET-A2 信息	91
表 B.3	影像集 SET-A3 信息	92
表 B.4	影像集 SET-A4 信息	92
表 B.5	影像集 SET-A5 信息	93
表 B.6	影像集 SET-D 信息	93
表 B.7	长沙市分析影像集信息	94
表 B.8	长沙市分析影像集信息	94
表 B.9	长沙市 CSK 影像集信息	95

第1章 绪论

1.1 研究背景及选题意义

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。改革开放以来我国经历了快速的城市化进程。随着城镇化进程的发展，我国建筑数量不断扩大，相关数据显示存量住房已超 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]。仅 2024 年一年，全国改造老旧小区数量便达到 5.8 万个^[3]。这些老旧建筑在结构老化、不利地质条件、不规范工程施工等不利因素的综合影响下安全隐患巨大，严重阻碍了城市的安全发展进程。如图 1.1 所示，近年来我国发生了系列惨痛的房屋安全事故。例如，2009 年 6 月，上海某住宅楼整体倾倒；2019 年 5 月 20 日，广西壮族自治区百色市一处酒吧发生钢架结构屋顶坍塌事故，造成 87 人受伤、6 人死亡；2019 年 8 月 28 日，深圳市罗湖区一栋居民楼发生楼体倒塌；2020 年 8 月 29 日，山西省临汾市襄汾县一两层饭店坍塌，造成 29 人遇难；2022 年 4 月 29 日，长沙发生特别重大居民自建房倒塌事故，直接造成 54 人死亡；2023 年 6 月，天津某小区多栋高层住宅发生倾斜，导致超过 3000 人紧急撤离；2023 年 7 月齐齐哈尔市第三十四中学校体育馆突发发生坍塌，直接造成 11 人死亡；2024 年 5 月 27 日安徽省铜陵市某小区发生楼房坍塌事故，造成 5 人失联。

为提高建筑安全水平，加强监测预警正成为社会普遍共识。习近平总书记曾在长沙 4·29 事故发生后指出：“要对全国自建房安全开展专项整治，彻查隐患，及时解决。坚决防范各类重大事故发生，切实保障人民群众生命财产安全和社会大局稳定。”此外，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；党的二十大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；二十届三中全会在《中共中央关于进一步全面深化改革，推进中国式现代化的决定》中指出，要完善公共安全治理机制，强化基层应急基础和力量，提高防灾减灾救灾能力。为此，岳清瑞院士提出“风险源-承灾体-减灾力”理论框架，认为监测预警是“减灾科技”的主要方面之一^[4]；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）》，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》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。鉴于建筑在安全事故发生前可能存在较为明显的异常变形征兆，且异常变形往往是建

筑发生倒塌的必要条件，因此提出大范围、低成本、可持续性的建筑群变形监测方法，有利于助力建筑风险评估，从而提高建筑安全风险的管控水平。



图 1.1 近年我国建筑事故

传统结构健康监测发展至今已有 30 多年的历史，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。如表 1.1 所示，当前传统建筑变形监测方法对于单栋建筑结构的健康监测方案已较为成熟，但在面对大规模城市建筑群的常态化变形监测时存在系列短板，包括：（1）效率低，水准测量等需要大量重复性人力劳动；（2）成本高，传统安装传感器的监测方法和 GPS 监测方法均需要安装大量传感器；（3）基线（Baseline）数据缺失，不利于建筑性能退化分析（4）覆盖范围小，无法一次性覆盖大范围存量建筑群。因此，已有传统建筑变形监测方法尚无法满足未来“城市体检”机制构建的实际需要，无法为“城市房屋养老金”、“房屋保险制度”等提供基础监测数据保障。

表 1.1 传统建筑变形监测方法^{[5][6]}

测量方式	水准测量	原位传感器	GNSS	机器视觉	LiDAR
监点分布	单点	单点	单点	点云	点云
精度	mm	mm	mm	mm	cm
周期	长	短	短	短	较短
成本	高	高	较高	较低	较高

星载合成孔径雷达干涉测量技术（Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR）是一种新兴的大规模城市建筑变形监测方式。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系列影像进行干涉处理, 再依据干涉相位反演观测目标变形^[7]。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-1 (S1) 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观测精度, 并可基于历史影像追溯建筑历史变形, 解决传统监测方式基线数据缺失问题。因此, 对于未来开展常态化的“城市体检”, 利用星载 InSAR 技术开展建筑变形监测, 再基于变形结果开展建筑风险评估具有显著优势。当前, 星载 InSAR 技术已广泛应用于矿区地表沉降^[8]、地震变形^[9]、山体滑坡^[10]、基础设施变形^[11]等监测领域。

1.2 InSAR 技术研究进展

面对不同的应用场景需求, 当前 InSAR 技术已衍生出多种子技术。在建筑变形监测领域, 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。

D-InSAR 技术最早在 1989 年 Gabriel 等^[12]的研究中提出, 之后 Bamler 等^[13]和 Rosen 等^[14]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 1.2 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 (Line of Sight, LOS) 上的变形^[5]。

由于 D-InSAR 技术直接对两景 SAR 影像的全像素进行干涉处理, 解析速率和精度较低, 噪声干扰也较为严重。同时, 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^{[15][16]}于 2000 年提出了经典的永久散射体干涉测量 (Persistent Scatterer Interferometry, PSI) 技术。

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, 并有效克服了噪声干扰; 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^[17]进一步提出了 SqueeSAR 算法, 可进一步识别分布式散射体 (DS) 进行变形监测, 在一定程度上弥补了 PSI 技术的不足^{[18]-[22]}。

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, 或一些干涉对干涉质量差的问题。为此, Berardino 等^[23]于 2002 年前后提出了

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^{[24]~[26]}。为进一步提升技术的适用性，Hooper 等^[27]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。

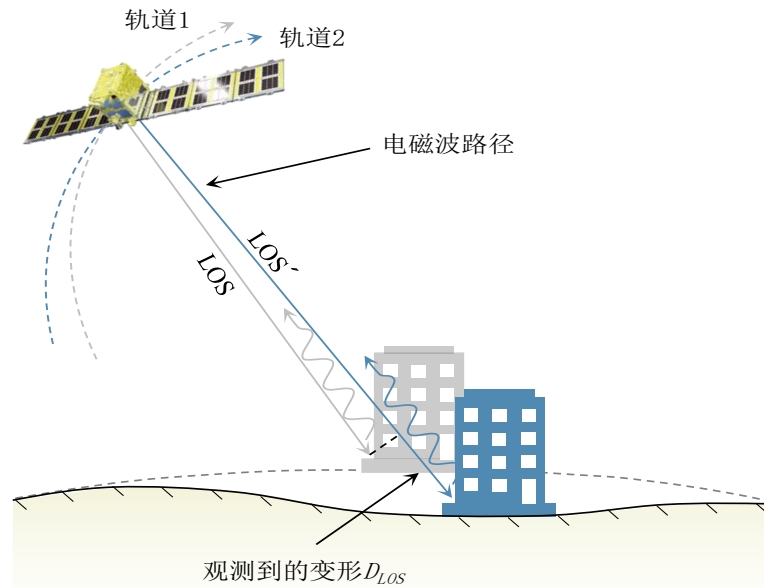


图 1.2 SAR 卫星观测示意图

由于 SAR 影像在密集建筑区易存在较为严重的叠掩现象^[28]。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^{[29][30]}。因此，TomoSAR 技术也被称为 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。为此，Lombardini 等^[31]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（1.1）表示，在变形反演方面并未考虑非线性变形的情况^[32]。

$$g_n = \int \int_{\Delta s \Delta v} \gamma(s, v) e^{-j2\pi(\xi_n s + \eta_n v)} d_s d_v \quad (1.1)$$

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。为更加准确估计非线性温度变形，Reale 等^[33]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（1.2）。式中， k 为热膨胀参数。

$$g_n = \int_{\Delta s} \int_{\Delta v} \int_{\Delta k} \gamma(s, v, k) e^{-j2\pi(\xi_n s + \eta_n v + \zeta_n k)} d_s d_v d_k \quad (1.2)$$

表 1.2 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 20 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。

表 1.2 InSAR 技术特性统计

技术	提出时间	主要突破与优势	适用性
D-InSAR	1989	提取地表变形，影像需求量少	地震、滑坡等短时 大变形场解析
PSI	2001	克服噪声、大气干扰获取变形时序	大范围城市建筑群 变形解析
SBAS-InSAR	2002	克服干涉对时间基线过长问题	边坡、裸土区等处 低层建筑变形解析
D-TomoSAR	2005	克服建筑叠掩提高测点密度高	单体建筑精细化变 形解析

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。

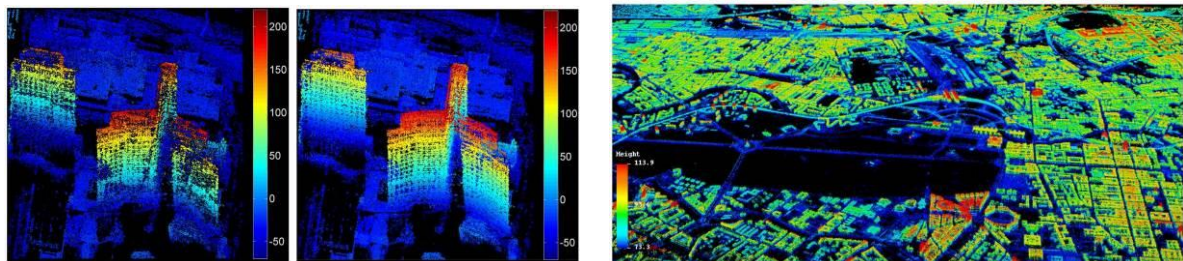
1.3 时序 InSAR 技术在建筑变形监测领域应用研究现状

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，且建筑业行政主管部门对技术认可度不高。其主要原因在于，利用 InSAR 技术对城市建筑群的变形监测多停留在单一的广域尺度或建筑局域尺度，未有研究提出从城市尺度到建筑结构分析尺度的建筑变形监测与风险评估体系，尤其对于高层建筑监测的有关研究还较为少见^[34]。同时，现有基于 InSAR 技术的建筑风险评估多利用变形量、变形速率、不均匀沉降等宏观变形指标，与结构理论结合较为缺乏，造成建筑异常变形识别精度和风险评估结果可靠性不足。此外，与建筑工程规范缺乏有效对接也是星载 InSAR 技术难以实际工程大范围应用的主要原因。

1.3.1 建筑变形测点密度与观测精度

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》GB 5092-2014^[35]、《工程测量标准》GB 50026-2020^[36]、《工业建筑可靠性鉴定标准》GB 50144-2019^[37]、《建筑基坑工程监测技术标准》GB 50497-2019^[38]、《危险房屋鉴定标准》JGJ 125-2016^[39]、《建筑安全星载干涉雷达监测技术规程》T/CECS 1165-2022^[40]、《InSAR 沉降监测预警规范》T/SZEMA 0002-2023^[41]等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建筑测点密度，以及在时间维度上所获取变形序列的精度。

一方面，SAR 卫星影像分辨率是能够在建筑上获取测点密度的关键因素。Ma 等^[42]对香港国际机场航站楼的观测结果表明，在更高精度的 COSMO-SkyMed (CSK) 和 TerraSAR-X (TSX) 影像中识别到的测点数量分别超过了 Sentinel-1 (S1) 影像的 5 倍和 30 倍。Adam 等^[43]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^[44]和 Perissin 等^[45]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^{[17][26]}。如图 1.3 (a) 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^{[46]~[49]}。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^{[46][50]}。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^[51]；另一方面可以通过三维点云的几何特征进行匹配。如图 1.3 (b) 所示，Wang 等^[52]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) 单体建筑单双散射体结果^[49]

b) 建筑点云匹配结果^[52]

图 1.3 InSAR 技术识别建筑测点

表 1.3 InSAR 技术建筑变形观测精度研究

对比数据	文献	技术	对比方式	InSAR 技术测量精度
水准测量	Juan 等[54]	PSI	区域平均	变形测量误差约 2mm
	Garcia 等[55]	PSI	临近测点	竖向变形均方根误差<5mm
	Perissin 等[56]	PSI	临近测点	变形标准差<2mm/yr
	Zeni 等[57]	SBAS	临近测点	变形测量标准差约 5mm, 变形速率偏差<1mm/yr
	Karila 等[58]	PSI	测点插值	竖向变形偏差<1mm
GNSS	Yang 等[59]	PSI	测点插值	均方根误差约 1mm
	Barla 等[20]	SqueeSAR	临近测点	变形分量演化趋势高度一致
	Osmanoglu 等[60]	PSI	临近测点	变形速率均方根误差 6.9mm/yr
	Poreh 等[61]	PSI	测点间距 <1000m	变形速率标准差<10mm/yr
	Fabris 等[62]	PSI	测点间距 <200m	变形速率差异<5mm/yr
GBSAR	Ng 等[63]	改进的 PSI	测点间距 <90m	竖向变形速率偏差 0.75mm/yr
	Crosetto[64]	PSI	临近测点	温度变形标准差 0.04 mm/°C

星载 InSAR 技术的变形监测精度受到众多因素的影响。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^[53]，但实际变形观测精度易因影像相干性、外部数字高程模型（Digital Elevation Model, DEM）偏差、大气延迟相位、历史温度数据等因素的干扰而产生误差。因此，已有研究对星载 InSAR 技术在实际建筑结构变形监测中的精度开展了系列校验。表 1.3 列出了星载 InSAR 技术在城市建筑群或单体建筑结构变形监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^{[58][59]}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，得到的测量偏差明显更小；从文献^{[61]~[63]}的对比结果也可见，随所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，由于各类时序 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，这也在一定程度上制约了星载 InSAR 技术的推广应用。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星载 InSAR 技术所反演建筑结构变形的可靠性。

1.3.2 以异常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 技术监测建筑结构变形的首要目标。得利于 SAR 卫星开阔的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监测，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。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。

建筑因自身特性诱发的变形主要包括自重特性诱发变形、材料特性诱发变形两类。对于自重特性诱发的变形，主要是由于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^{[61][65][66]}。此类变形主要与地基土质^{[67]~[70]}和基础形式^{[71]~[77]}具有强相关性。如图 1.4 (a) 所示，由于此类建筑变形往往以竖向沉降的形式存在，因此只需知道雷达波的入射角 θ 便可将观测到的 LOS 向变形 Δ_{LOS} 转化为建筑沉降 Δ 。在大范围建筑变形监测时，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^{[78]~[80]}。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。此外，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^{[81]~[83]}。如图 1.4 (b) 所示，建筑温度变形往往沿结构纵向累积，同样容易通过 SAR 卫星观测到的 LOS 向变形 Δ_{LOS} 转换得到。此类建筑结构变形监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^{[64][84]}和 Reale 等^[33]提出基于温度相位拓展的变形反演模型，显著提高了建筑周期性温度变形的监测精度，为建筑长周期变形的精细化监测奠定了基础。在此基础上，已有部分研究利用星载 InSAR 技术获取建筑的温度变形及温度变形系数^{[85]~[87]}，进而在精细剔除建筑温度变形后识别建筑的收缩徐变或倾斜变形^{[88][89]}。

建筑因人为干扰因素诱发的变形主要包括地下水开采诱发变形、地下隧道开挖诱发变形、地下矿区开采诱发变形。地下水诱发的沉降会随着城市的扩张而发展^[90]，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^[91]和 Gumilar 等^[92]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、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。对于地下隧道开挖诱发的建筑变形，可利用多视角 SAR 卫星联合观测，进而高效绘制建筑场地的沉降剖面及沉降边界^{[93]~[95]}，在提高监测效率的同时极大节约监测成本。地下矿区开挖诱发建筑变形与地下隧道开挖诱发建筑变形的监测方法较为类似，但由于矿区开挖导致的变形量较大，因此可能导致变形反演的困难^[96]。

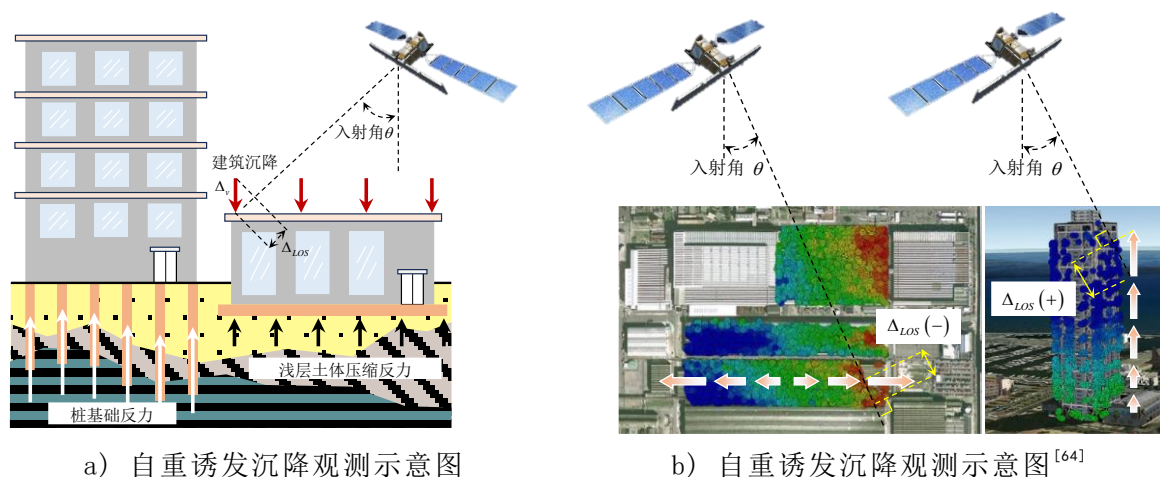


图 1.4 建筑自身特性诱发变形

建筑因自然因素诱发的变形主要包括地震诱发变形、降雨诱发变形、土体滑坡诱发变形。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^{[97][98]}。另一方面，利用星载 InSAR 技术可对未倒塌建筑继续使用时的变形稳定性进行定期监测^[99]。Sciortino 等^[100]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。对于土体滑坡导致的建筑变形，由于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^{[101]~[104]}。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^{[63][105]}。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。已有研究表明因而降雨诱发的建筑变形可能存在一定的滞后效应，利用 SAR 卫星长期在轨观测的优势，对于此类建筑变形可以开

展更为高效且可持续的监测^{[106]~[109]}。

表 1.4 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^[86]、地基固结沉降^[89]、施工诱发变形^{[110][111]}、地下水诱发变形^[112]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^[85]。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^{[22][70]}、降雨诱发变形^[106]发生耦合。在土体滑移区，建筑结构变形还易受到降雨的共同影响^[104]。此外，Sheng 等^[113]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^[114]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 技术变形监测精度造成影响。由于 InSAR 技术求解变形是对干涉相位进行最优化参数估计的过程，因此当建筑同时存在表 1.4 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对趋势项的反演的偏差^[115]。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^[111] Han 等^[107]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监测结果的可解析性。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，参考点的不稳定易对建筑结构异常变形识别造成影响。

表 1.4 不同诱因下的建筑变形特征

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
土体滑移	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

1.3.3 基于时空分析的建筑风险评估

建筑过大的异常变形可能导致结构失稳、损伤等风险，进而导致建筑正常使

用功能和承载能力的下降,甚至引发严重的建筑倒塌事故。因此,基于星载 InSAR 技术的变形监测数据,有望实现结构失稳、损伤等风险的定性分析和定量评估。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,主要可归纳为基于时序变形分析的风险评估方法,及基于时空变形场分析的风险评估方法两类。

基于时序变形分析的风险评估方法一般利用累计变形量、平均变形速率及变形趋势等作为风险评估指标。已有研究证明,诸多情况下的房屋损伤与其时序变形结果具有较强相干性^{[91][92][116][117]},这为此类风险评估方法建立了依据。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,因此得到了广泛的应用,包括建筑风险的定性评估^{[118]~[121]}和基于变形阈值的建筑风险量化评估^{[21][98][122]}。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^{[123][124]}。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^{[100][125]},导致方法的局限性十分明显。一方面,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;另一方面,此类方法忽略了不同变形模式对建筑风险的影响,导致建筑风险评估结果可靠性不足。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。一方面,此类方法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,由于建筑表观装饰的存在,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。另一方面,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的普适性和可靠性是进一步研究的关键。

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。为进一步挖掘星载 InSAR 技术所获取建筑变形结果的实用价值,一些学者综合测点变形时序和空间位置,提出了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^{[94][126]}。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^[127]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^[128]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^[129]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^[55]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^{[111][130][131]}, 进一步提高了风险评估方法的可靠性和实用性^[132]。同时, 获取三维变形指标的演化趋势^[133]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, 已有基于时空变形分析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。

1.3.4 与结构理论结合的建筑风险评估

为克服上述方法的局限性, 一些研究尝试将建筑结构理论与星载 InSAR 技术结合开展建筑风险评估。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转化。这种类型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^{[134][135]}, 或无重力均质弹性梁模型^[136], 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。一些研究将星载 InSAR 技术获取的变形结果作为有限元分析的输入, 更为准确识别处于不利受力状态的结构构件^{[137][138]}。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。

1.4 本文研究内容

综合上述论述，当前基于星载 InSAR 技术开展建筑变形监测与风险评估的不足主要在于：（1）风险评估方法与建筑结构理论的结合性不强，导致风险评估指标不够完善，风险评估结果存在一定片面性；（2）对建筑异常变形结果解析不够深入，多停留在建筑区域宏观变形场分析；（3）对建筑变形模式缺乏系统性梳理，高层建筑异常变形识别方法效率较低。鉴于此现状，本文基于国家自然科学基金项目《基于星载 InSAR 变形测量和信息共享平台数据的大跨度桥梁结构状态评估方法》（52278306）、湖南省重点研发计划项目《基于星载 InSAR 技术的城市桥梁群多灾害条件下状态评估与预警研究》（2022SK2096）、湖南省自然科学基金项目《基于天-空-地一体化的基础设施结构安全监测技术研究》（2023JJ70003）、湖南省水利厅水利科技项目《基于“天-空-地”一体化的渡槽结构损伤检测及状态评估研究》（XSKJ2023059-31）、湖南省应急管理厅科技项目（yjtkjxm_202406）开展相关研究，主要内容如图 1.5 所示。

（1）基于对 PSI 技术变形解析流程中参数估计、温度输入、参考点选择等步骤的优化，提出面向城市建筑群的可靠变形监测方法。具体包括：系统梳理常用于建筑变形监测的 SAR 卫星系统，选择可靠的 SAR 卫星影像来源；深入研究 InSAR 技术干涉原理，对 PSI 技术的建筑变形观测精度进行综合评估；针对建筑变形监测特点，研究 PSI 技术测点可靠选取方法；考虑建筑结构显著温度变形影响，选取包含温度相位的干涉相位模型及可靠的温度数据源反演变形；针对复杂的城市建筑群变形监测场景，确定稳定参考点选取方案；研究融合卫星升降轨观测的建筑 LOS 向变形分解方法，奠定后续建筑变形监测结果校验基础。

（2）基于 PSI 技术与建筑结构理论的结合，系统性分析低层建筑异常的变形特征，提出低层浅基础建筑群异常变形风险评估方法。具体包括：利用 GNSS 监测数据，对 PSI 技术广域建筑群变形监测结果进行校验；系统性梳理低层浅基础建筑典型变形模式，并建立清晰的量化分类；结合城市大数据，提出建筑群变形多尺度监测与分析方法；提出更为完善的结构风险评估指标体系及风险评估方法，提高现有低层浅基础建筑风险评估的可靠性；以中国台北市为例，验证所提出方法的可靠性。

(3) 基于 PSI 技术获取建筑高度向变形，系统分析高层建筑变形模式，提出高层建筑异常变形高效识别及量化方法。具体包括：利用 GPS 监测数据，对 PSI 技术高层建筑变形监测精度进行验证；从 SAR 卫星独特观测视角出发，系统性归纳高层建筑典型变形模式；充分考虑高层建筑的复杂变形分量，提出温度相关变形系数概念及计算方法，并提出基于温度相关变形系数演化趋势的高层建筑异常变形识别及量化方法；以长沙市为例，对 9 栋代表性高层建筑进行变形监测与分析，验证所提出方法的可靠性。

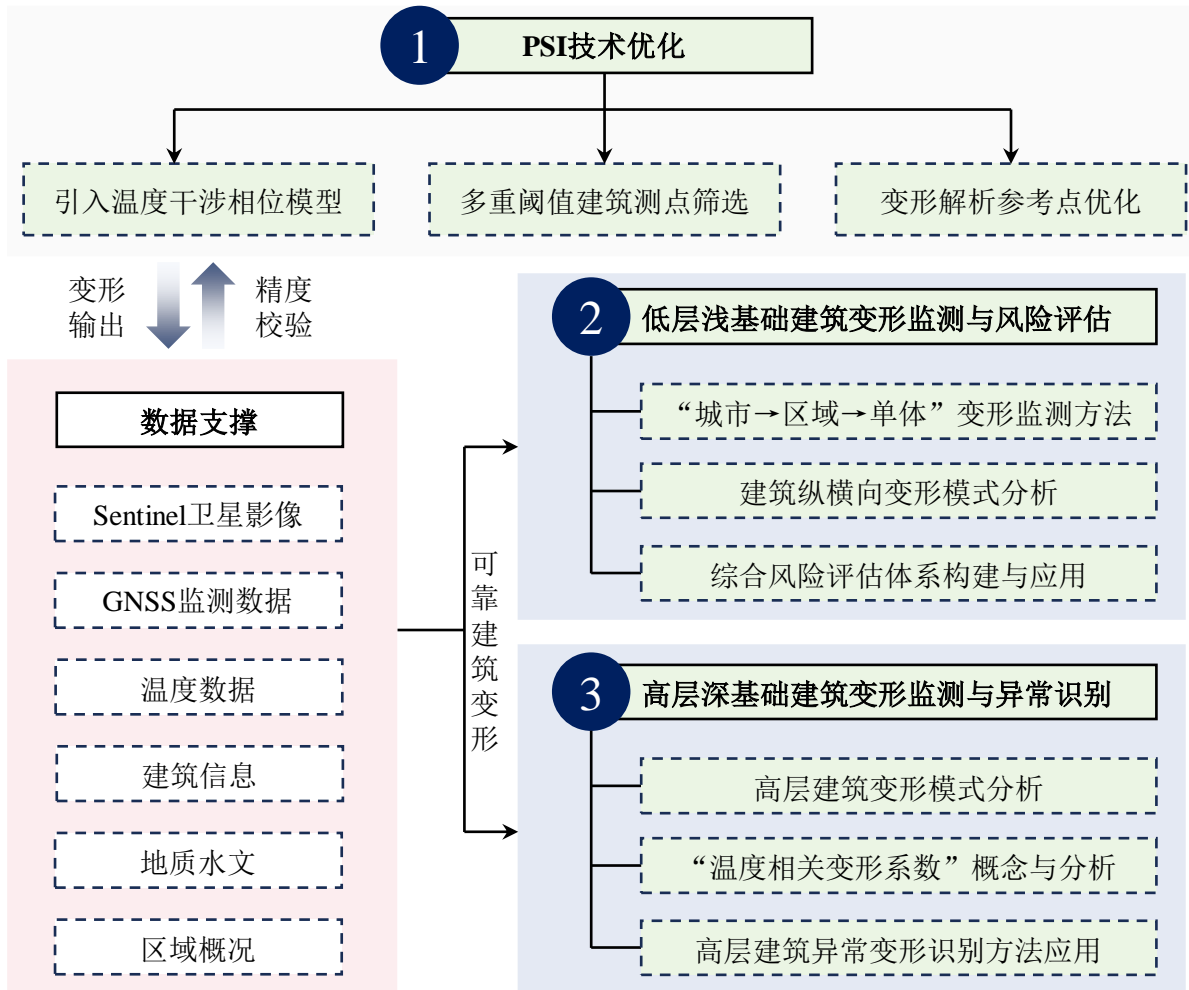


图 1.5 研究内容

第2章 星载 InSAR 变形监测技术基本原理

2.1 引言

基于星载 InSAR 技术的建筑变形监测精度受到卫星硬件、求解参数、人为经验等的多方面影响。为全面阐述利用星载 InSAR 技术监测建筑变形的可行性，且进一步提高星载 InSAR 技术在建筑变形监测中的精确性与可靠性，为后续开展建筑风险评估奠定基础，本章将首先归纳常用于建筑变形监测的 SAR 卫星，并统计各卫星系统的主要参数，选择适用于大范围建筑群监测的卫星影像源；其次，为使读者更为深入了解星载 InSAR 技术，本章将系统介绍星载 InSAR 技术的基本原理，重点介绍 PSI 技术的基本原理及解析流程；最后，本章将基于 PSI 技术提出优化的建筑变形解析方法，并详细论述对 PS 点筛选、大气温度选用、参考点选取、变形分解、结果校验等步骤的改进，以期进一步提高 PSI 技术监测建筑变形的可靠性与实用性。

2.2 SAR 卫星系统

近 20 多年来 SAR 卫星系统得到了长足的发展。表 2.1 列出了当前在建筑变形监测中常用的 SAR 卫星系统^[139]。从波段看，C 波段和 X 波段卫星在建筑变形监测中较为常见，其中 C 波段卫星具有更强的穿透性，X 波段卫星具有更高的空间分辨率。幅宽方面，SAR 卫星单景影像普遍具有数十公里甚至上百公里的幅宽，这意味着可以一次性获取城市级范围建筑群的变形数据，极大提高变形监测效率。此外，通过多星组网等方式，SAR 卫星重返周期正在被逐渐缩短，这有利于后期建筑动态风险评估的开展。总体而言，为适应地表多样化感知和高精度变形监测的需求，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。

本研究选择 Sentinel-1 (S1) 卫星影像数据开展后续研究，以期基于低成本、中分辨率的影像数据，获取高可靠度的建筑异常变形识别与风险评估结果。S1 卫星如图 2.1 所示，是欧洲航天局哥白尼计划 (Copernicus Programme) 中的地球观测卫星。在该计划中，计划发射 Sentinel-1~Sentinel-6 共 6 个卫星星座，其中 S1 星座为 SAR 卫星。2014 年欧空局发射了 Sentinel-1A (S1A) 卫星，可实现 12 天重返观测。2016 年 S1B 卫星发射升空，与 S1A 处于同一轨道平面，可将 S1 星座的重访观测周期缩短至 6 天。该卫星拍摄模式包括条带模式 (SM)、干涉宽幅模式 (IW)、超宽幅模式 (EW) 等，在变形监测领域常用的模式为宽幅干涉模式，具备 $5 \times 20\text{m}$ 的空间分辨率，幅宽可达 250km。自 S1A 卫星 2014 年入轨以来，已具

备 10 年的全球影像数据积累，且影像数据开源获取，这对大范围监测地表变形创造了有利条件，也因此被广泛应用于山体滑坡、地表沉降等的监测之中。

表 2.1 常用于建筑变形监测的 SAR 卫星系统^[139]

卫星系统	入轨时间	波段	分辨率 (m)	极化 方式	幅宽 (km)	重返周期 (天)
ERS-1/2	1991/1995	C	25	VV	100	35
ENVISAT	2002	C	20	VV/HH	100~400	35
ALOS-1/2	2006/2014	L	1~100	VV/HH	25~490	46/14
S1	2014	C	5/20	双极化	20~400	12
CSK	2007	X	1/3/15	全极化	10~200	1~16
TSX	2007	X	1/3/16	双极化	5~150	11



图 2.1 Sentinel-1 卫星

2.3 星载 InSAR 技术概述

2.3.1 InSAR 技术基本原理

InSAR 技术是一种主动式雷达遥感观测技术，通过发射并接收雷达波进行地面观测。在 SAR 系统中，雷达波通过传感器向地面发射，当信号与地面物体发生相互作用时，部分信号会反射回雷达接收器。雷达通过接收这些反射回来的信号，根据回波的相位、振幅以及卫星系统记录的传感器参数等反演地表地形与变形。由于电磁波具备一定的穿透性，且不受可见光影响，因此星载 InSAR 技术尤其适用于云层密布、恶劣天气或夜间等情况下的建筑变形监测。

要实现地表地形和观测目标变形的反演，需要对同一地区获取的两幅 SAR 影像进行干涉处理，并提取观测点位回波信号的相位差。这一过程的实现主要有两种模式，一是双天线一次过境模式，二是单天线重复过境模式。前者是在同一航

天飞机、航空飞机等平台上一次性挂载两套存在一定位置差异的 SAR 系统，利用雷达波信号单一方位发射两方位接收，实现两幅 SAR 影像的获取。后者是星载 InSAR 技术常用的观测模式，即卫星搭载一套 SAR 系统，通过精密轨道控制，使卫星以固定时间和轻微轨道偏移重复过境同一地区上空，通过电磁波两次发射两次回收的方式，获取干涉所需的两幅 SAR 影像。InSAR 技术 SAR 卫星影像通过复数形式存储，每个像素点记录了回波信号的振幅、相位等信息。

InSAR 技术最初被用于地表高程信息反演，其理想状态下的干涉几何原理如图 2.2 (a) 所示^[139]。图中 S_1 和 S_2 分别代表两次卫星过境的空间位置， P 和 P' 分别表示地表观测点位置变化前后的空间位置， B_{\perp} 为 SAR 卫星与观测点间的 LOS 向距离，用 SP 表示。 B 为卫星两次过境时轻微轨道差异引起的空间基线，可将其分解为平行于 LOS 向的平行基线 B_{\parallel} ，以及垂直于 LOS 向的垂直基线 B_{\perp} 。 θ 为电磁波的入射角， α 为空间基线与水平方向的夹角。由几何关系易得：

$$B_{\parallel} = B \sin(\theta - \alpha) \quad (2.1)$$

$$B_{\perp} = B \cos(\theta - \alpha) \quad (2.2)$$

对两幅 SAR 影像干涉处理获取相位差后，可得：

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda}(SP - SP') \quad (2.3)$$

式中， $\Delta\varphi$ 为相位差， λ 为雷达波波长。再依据余弦定理可得：

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha - \theta\right) = \sin(\theta - \alpha) = \frac{S_1P' + B^2 + S_2P'}{2S_1PB} = \frac{(S_1P - S_2P)(S_1P + S_2P)}{2S_1PB} + \frac{B}{2S_1P} \quad (2.4)$$

在实际观测中，卫星对地距离远大于空间基线 ($S_1P \gg B$)，同时 $S_1P \gg S_1P - S_2P$ ，因此 $S_1P + S_2P \approx 2S_1P$ ，代入上式可进一步得到：

$$\sin(\theta - \alpha) \approx \frac{S_1P - S_2P}{B} \approx -\frac{\lambda\varphi}{4\pi B} \quad (2.5)$$

由于相对于地球参考椭球面的高度 $h = H - S_1P \cos\theta$ ，因此可得相位与观测点高度间的关系为：

$$h = H - S_1P \cos\left(\alpha - \arcsin\left(\frac{\lambda\varphi}{4\pi B}\right)\right) \quad (2.6)$$

上述各式的推导忽略了地表观测目标在卫星两次过境期间发生的位移或变形，同时尚未考虑大气、噪声等对干涉相位的干扰。实际观测中，地表观测目标发生位移或变形时的干涉几何示意如图 2.2 (b) 所示，干涉相位组成如下式所示。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，DEM 又可由式 (2.6) 计算得到； 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。如式 (2.7) ~ (2.10) 所示，将上述相位去除后可得对应的变形相位 φ_{def} 。

$$\varphi = \varphi_{\text{ref}} + \varphi_{\text{top}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{noi}} \quad (2.7)$$

$$\varphi_{\text{ref}} = \frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel} \quad (2.8)$$

$$\varphi_{\text{top}} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp} \varepsilon}{S_1 P \sin \theta} \quad (2.9)$$

$$\varphi_{\text{def}} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (2.10)$$

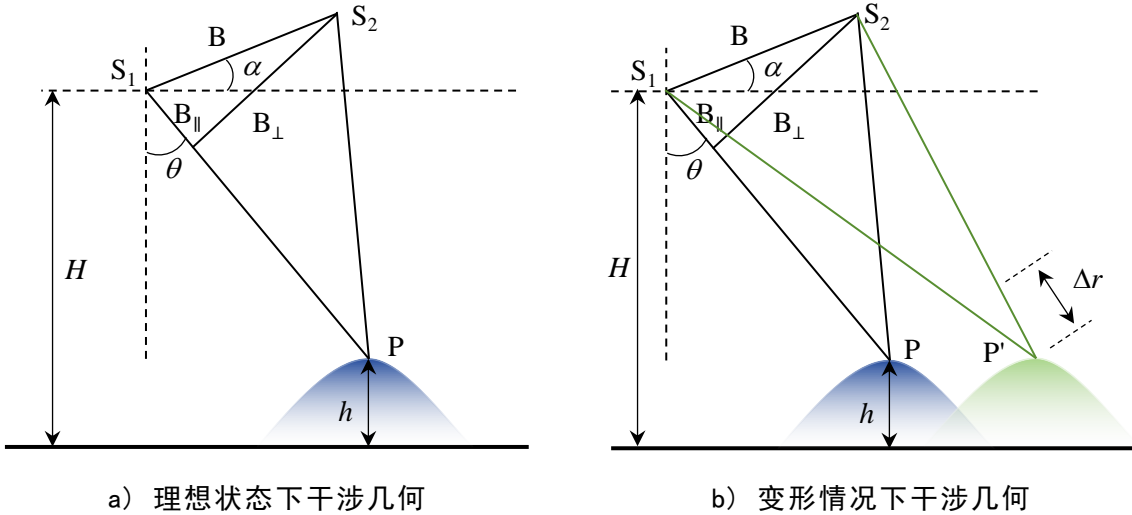


图 2.2 干涉几何示意图

由于在 SAR 影像中仅独立存储了各像素点 $[-\pi \sim \pi]$ 间的相位值，当真实相位 φ 大于 π 时将缠绕进 $[-\pi \sim \pi]$ ，即存在整周期模糊问题。因此，除上述干涉几何原理外，相位解缠是 InSAR 技术的另一核心原理。如图 2.3 所示，缠绕相位 φ 呈现周期性变化，需要通过相位解缠将相位由主值或相位差值恢复为真实值。相位解缠的主要方法包括基于路径跟踪的相位解缠算法^[140]、基于最小范数的相位解缠算法^[141]、网络流算法^[142]、基于卡尔曼滤波的相位解缠算法^[143]，以及基于深度学习的相位解缠算法^[144]等。

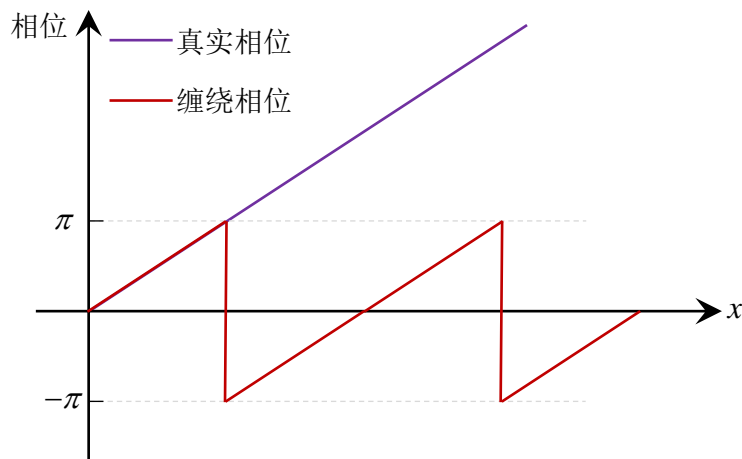


图 2.3 相位解缠示意图

2.3.2 PSI 变形监测技术

PSI 技术是一种时序 InSAR 技术，PSI 技术总体流程如图 2.4 所示，其主要步骤包括影像配准、永久散射体（PS）选取、大气效应剔除、变形估计等^[145]。该技术的主要特点在于可利用一系列 SAR 影像提取观测目标的变形时序。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，此后识别后向散射特性稳定的 PS 点，对 PS 点进行合理化构网，再对 PS 网络中每一连线两端的差分干涉相位开展准确估计，进而反演点位变形。由于在建筑结构上往往能够识别到较多 PS 点，因此 PSI 技术常被应用于建筑变形监测。

在主影像选择中，应同时遵循时间基线最小原则、空间基线最小原则以及多普勒质心频率基线最小原则，数学表达式如式（2.11）~式（2.13）所示^[146]。

$$\sum_{i=1}^N |B_i| = \min \quad (2.11)$$

$$\sum_{i=1}^N |T_i| = \min \quad (2.12)$$

$$\sum_{i=1}^N |F_{DC}^i| = \min \quad (2.13)$$

式中， N 为影像数量， B_i 为第 i 景影像空间基线， T_i 为第 i 景影像时间基线， F_{DC}^i 为第 i 景影像多普勒质心频率基线。

步骤 1：影像配准。在主、副影像配准中，可选择相干系数法、最大干涉频谱法、相位差影像平均波动函数法、最小二乘法等^[147]。在本研究中，选择应用较为广泛且可靠的相干系数法。该方法首先在主影像上选取均匀分布的控制点，并在待配准影像上选取以同名点为中心的匹配窗口，在匹配窗口移动过程中计算匹配指标值，依据匹配指标最优原则确定匹配窗口内的最佳同名点。需要注意的是，为保证检索同名点的可靠性，需要先采用较小的匹配窗口完成初步同名点检索，此后放大匹配窗口重复检索同名点，直到检索出的同名点趋于稳定。其次，利用多项式模型描述主副影像间同名点的坐标映射关系，通过坐标变换和重采样处理开展影像配准。最后，相干系数法将逐点计算配准后影像的相干系数，通过相干系数评估配准质量。本研究选取的配准残差阈值为 0.05 像素，有研究表明配准精度达到 0.1 个像素时可较为准确获取干涉相位^[148]。

步骤 2：高程数据引入。由于在本研究中利用星载 InSAR 技术的主要目的在于监测变形，因此需要将地表高程相位剔除。为此，本研究引入外部 DEM 进行高程相位剔除。本研究选用美国航天飞机雷达测图任务生产的全球 1 角秒（Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc-second, SRTMGL1）DEM 数据^[149]，其分辨率约为 30 米。在该任务中，美国宇航局（NASA）和国防部国家地理空间情报局

(NGA) 合作获取了全球 DEM, 被广泛应用于地形分析、水文建模、环境监测、城市规划以及星载 InSAR 分析等领域中。

步骤 3: PS 点选取。在 PS 点选取阈值方面, 阈值类别一般包括相位离差阈值^[150]、振幅离差阈值^[151]、相干系数阈值^[152]等。在 PS 点构网方面, 可选用高效的 Delaunay 三角构网生成方法。Delaunay 算法能够适应各种复杂的输入数据集, 包括不规则分布的点集, 并且计算速度较快, 特别是在大规模数据集的情况下。由于其较低的计算复杂度, Delaunay 三角网在处理大规模数据时依然能够保持较高的效率。

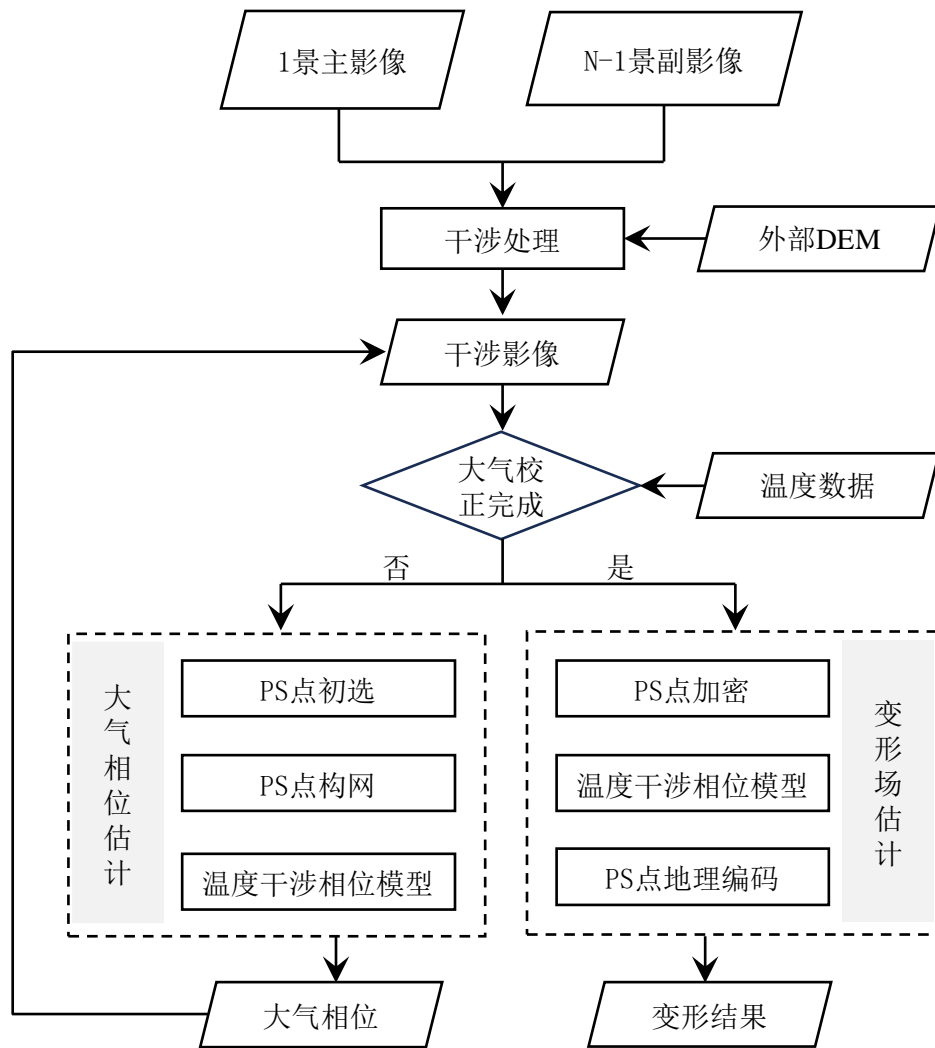


图 2.4 PSI 技术流程^[105]

步骤 4: 变形估计。在参数估计环节, 传统 PSI 技术的差分干涉相位模型如式 (2.14) 所示^{[15][16]}。

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta T \Delta v + \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R \sin \theta} \Delta RTE + \Delta\varphi_{res} \quad (2.14)$$

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 点的速率差和高程残差, 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。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，可选用 Monserrat 等提出的包含温度项的拓展干涉相位模型^[153]，如式（2.15）所示。

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta T \Delta v + \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R \sin \theta} \Delta RTE + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta Temp \Delta The + \Delta\varphi_{res} \quad (2.15)$$

式中， $\Delta Temp$ 为不同观测时刻对应的温度差， ΔThe 为相连 PS 点的热膨胀参数差。

2.4 建筑 PSI 变形监测方法

除了星载 InSAR 技术所具有的共性优势外，相对于传统的 D-InSAR 技术，PSI 方法在建筑结构长期形变监测还具有一些显著的个性优势，主要包括以下几个方面：（1）测点获取高效。建筑墙角、窗台、女儿墙等处构成的空间二面角或三面角，易形成类似人造角反射器构造，使得电磁波回波信号稳定，因此利用 PSI 技术可以在建筑表面提取较多 PS 点。（2）建筑变形溯源。PSI 技术可以通过数年的影像提取建筑结构历史变形时序，这解决了传统结构健康监测中缺乏历史基线数据的问题，有利于开展结构性能演化分析。（3）结果可靠性高。通过较高的阈值设定，PSI 技术识别到的 PS 点具备较高置信度，同时领域 PS 点的差分处理可以在一定程度上克服大气效应的干扰，提高建筑变形观测结构的可靠性。为进一步提高 PSI 技术在建筑结构变形反演中的可靠性，需要重点关注 PS 点选取、大气温度选择、变形参考点选取等步骤。此外，由于星载 InSAR 技术求解流程较长，涉及诸多主观参数选择，因此需要对 PSI 技术获取的建筑变形结果进行校验。

2.4.1 PS 点选取方法

选取空间位置稳定的 PS 点目标，是 PSI 技术准确识别建筑结构变形的基础。相关研究表明，雷达回波信号幅值稳定性可在一定程度上表征 PS 点的稳定性^[16]。因此，可利用振幅离差指数 D_v 高效选取建筑结构上的 PS 点。振幅离差指数 D_v 的表达式如式（2.16）所示，式中 $\varphi(i, j)$ 表示某个像素点的相位时序， std 表示标准差， $mean$ 表示均值。

$$D_v(i, j) = \frac{std[\varphi(i, j)]}{mean[\varphi(i, j)]} \quad (2.16)$$

在实际应用中，可利用时序振幅离差系数 D_A 选取出建筑结构上后向散射特性稳定的 PS 点。 D_A 的表达式如式（2.17）所示，其中 σ_A 表示时序振幅标准差， m_A 表示时序振幅均值。

$$D_A = \frac{\sigma_A}{m_A} \quad (2.17)$$

为方便表达，可将振幅离差系数转化为振幅稳定系数（Amplitude Stability Index, ASI），其表达式如下：

$$ASI = 1 - D_v = 1 - \frac{\sigma_A}{m_A} \quad (2.18)$$

此时，ASI 越趋近于 1 表示该点稳定性越佳，作为 PS 点求解变形的可靠度越高。为降低大气效应干扰，在 PSI 标准技术流程基础上，可先设定较高的 ASI 值初步选择 PS 点构建 Delaunay 三角形网络进行大气相位去除，之后再放宽 ASI 限值条件对 PS 点进行加密。

在临近建筑的水域，由于电磁波在水体和建筑立面间可能存在多次折射，导致水体上出现较强烈的雷达波回波信号，此时单一通过振幅离差阈值法可能在水体处识别到部分虚假的 PS 点。此时，可利用式（2.19）所示的时序相关系数进行此类 PS 点的剔除。其中， M 和 S 分别代表主、副影像的复数信息， m 、 n 分别表示计算窗口的大小， $*$ 表示复数的共轭算子。

$$\gamma = \frac{|\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M(i, j) \cdot S^*(i, j)|}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |M(i, j)|^2 \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |S^*(i, j)|^2}} \quad (2.19)$$

2.4.2 大气温度数据选取

由式（2.15）可见，温度数据的准确性将极大影像干涉相位的反演结果。若温度数据出现过大大偏差，可能导致温度相位的欠估计或超估计，进而导致 PSI 所获取变形时序的异常。由于绝大多数建筑上缺乏原位温度传感器，因此温度需要从临近气象站^[154]、机场^[155]以及欧洲天气气象预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF）^[156]等处获取。

气象站空间分布较为稀疏，空间位置距离监测目标建筑距离较远，其记录温度数据与建筑实际环境温度可能存在较大差异。机场往往分布在城市郊区，其记录的温度数据仅对于机场周边建筑具有较高的适用性。ECMWF 是欧洲一个专门从事天气预报和气候研究的国际组织，成立于 1975 年，致力于为成员国提供高精度的天气预报数据，尤其是中期天气预报。作为全球天气预报领域的领导机构之一，ECMWF 以其高质量的数值预报产品、气候预测服务以及对全球天气变化的研究而著名。ECMWF 采用基于物理方程的高分辨率数值天气预报模型来模拟大气的变化，这些模型在全球范围内提供了高度准确的气温预测。其预报模型通过大气动力学、热力学、辐射等复杂的物理过程进行模拟，能够较为精确地捕捉气温变化的趋势。通过 ECMWF 可直接获取建筑周边地区小时级的历史气温数据，有利于提高 PSI 技术对建筑结构温度变形估计的准确性。

虽然机场和气象站温度数据的适用性有限，但由于温度数据是原位传感器实时记录的，具有较高的可靠度，因此在适用情况下可优先选择。此外，还可通过空间插值计算等方法^[157]拓展此类温度数据在 PSI 技术中的适用性。因此，面对缺乏历史温度数据的建筑结果，在利用 PSI 技术开展变形分析前，首先应提取建筑周边气象站、机场以及来自 ECMWF 等处的温度数据进行交叉校验，或选取附近建筑上温度传感器所记录的部分时段温度数据，对所选取温度数据进行校验，确保 PSI 技术变形反演的可靠性。

2.4.3 参考点选观测取与变形分解

在利用 PSI 技术监测建筑结构变形时易存在稳定点位置的难以确定的问题。若选择的变形解算参考点自身存在较大变形，那可能导致 PSI 技术输出的变形结果出现整体偏差。为此，在利用 PSI 技术监测建筑结构变形时应高度注意变形参考点的选取。

一方面，要确保参考点自身较高的可靠性。参考点自身的不稳定性可能导致全局的变形解析偏差。为提高参考点的可靠性，应优先选择雷达波后向散射特性稳定的点位，避开山脉、峡谷等局部气候、地质、植被等因素复杂的区域。此外，水面对于雷达波多为镜面反射，一般无法识别到稳定的 PS 点，部分在水域上识别到的 PS 点可能来自于雷达波的多次折射，其自身可靠性不高。另一方面，要重视人为干扰因素。过度的人为活动可能导致参考点附近的地面变形，这种变形往往是非自然的、瞬时的，可能对变形监测结果产生干扰。在对城市大范围建筑群开展 PSI 分析时，考虑相位解缠误差传递的原因，需要将参考点选在城市影像的中间区域，此时需要权衡频繁人为活动对参考点稳定性带来的影响。

对于 PSI 技术输出变形结果的校验，常用的数据有水准测量结果、GNSS 监测结果以及原位传感器记录的变形结果等。由于这些变形监测结果大多为单维度变形结果（如竖向沉降、东西向变形、南北向变形），与 PSI 技术直接观测到的 LOS 变形存在较大差异。因此，在开展变形校验之前，需要对 PSI 技术获取的 LOS 向变形进行三维分解，从而确保变形监测结果的可比性。

当所有 PS 点相对参考点的水平向变形接近为零时，可以近似认为 PS 点的 LOS 向变形 D_{LOS} 均由竖向变形产生。此时，PS 点的竖向变形 D_v 可以通过式(2.20)得到。式中， θ 为 SAR 卫星发射电磁波的入射角。

$$D_v = \frac{D_{LOS}}{\cos \theta} \quad (2.20)$$

对于更为精细化的需求，可通过卫星升降轨观测，利用图 2.5 所示的几何关系及式(2.21)、式(2.22)分解 PS 点竖向向和东西向变形。式中未考虑观测目标的南北向变形，其主要原因在于 SAR 卫星绕地球两极飞行，航向角 α 一般较小，因此

观测目标南北向变形导致的 LOS 向变形分量较小, 忽略南北向变形可保证二元一次方程的可解性, 同时令变形分解流程得以简化。

$$D_{LOS,a} = -D_e \cos \alpha_a \sin \theta_a + D_v \cos \theta_a \quad (2.21)$$

$$D_{LOS,d} = D_e \cos \alpha_d \sin \theta_d + D_v \cos \theta_d \quad (2.22)$$

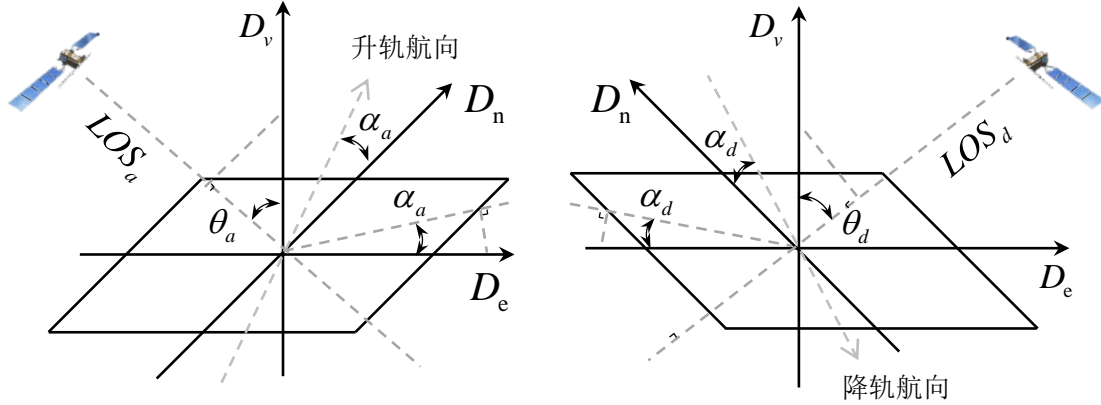


图 2.5 SAR 卫星升降轨观测示意图

2.5 本章小结

本章介绍星载 InSAR 技术的基本原理, 并重点论述了 PSI 变形监测技术的主要流程。此外, 本章针对建筑变形监测这一特定场景, 对 PSI 技术解析流程的关键步骤进行了详细论述, 并对部分步骤进行优化。主要包括:

(1) 介绍常用于建筑变形监测的 SAR 卫星系统, 选取 S1 卫星影像开展本文研究。当前, 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。鉴于 S1 卫星具备 10 余年来丰富的全球影像积累, 且数据全面开源获取, 因此本研究基于该卫星影像数据开展, 以期基于低成本、中分辨率的数据, 获取高可靠度的建筑异常变形识别与风险评估结果。

(2) 介绍 InSAR 技术基本原理, 选用考虑温度的干涉相位模型。PSI 技术是一种时序 InSAR 技术, 其主要步骤包括影像配准、永久散射体 (PS) 选取、大气效应剔除、变形估计等。考虑传统干涉相位模型无法准确反演高层建筑或大跨建筑的非线性温度变形, 因此本研究选用包含温度项的拓展干涉相位模型反演建筑变形, 以期提高建筑变形监测精度。

(3) 基于建筑变形监测这一特定化场景, 对 PSI 技术解析流程进行优化。综合利用振幅稳定系数与时序相关系数筛选高可靠度 PS 点, 选取气象站温度数据或来自 ECMWF 的局域温度数据提高建筑变形反演精度, 选取建筑区域高可靠度、高稳定性的参考点位开展变形解析, 分析 SAR 卫星升轨与降轨观测几何, 对建筑 LOS 向变形进行三维分解。

第3章 建筑异常变形识别与风险评估方法

3.1 引言

星载 InSAR 技术在遥感领域应用广泛，但将其应用于建筑变形监测，且开展建筑风险评估的研究还较为少见，其原因在于建筑结构形式多样、变形特征复杂，对建筑异常变形的解析存在困难。在少数利用星载 InSAR 技术开展建筑变形监测与风险评估的研究中，常直接将变形速率或变形量与风险等级挂钩，这忽略了结构类型及变形模式的区别，在风险评估可靠度及风险解析上存在较大不足。为此，本章的主要目的在于将星载 InSAR 技术与土木工程理论深度融合，提出更为可靠的建筑异常变形识别与风险评估方法。针对低层建筑，本章将提出“城市-片区-单体”的多尺度变形监测方法，引入城市大数据的开展城市变形场分析，系统归纳典型的建筑异常变形模式，并区分建筑整体变形风险与结构损伤风险，进而提高建筑综合风险评估方法。针对高层建筑，本章将系统归纳典型的建筑变形模式，区分传统意义上的结构温度变形，提出温度相关变形系数概念，并基于该温度相关变形系数系数的演化趋势，提出一种更为高效的建筑异常变形识别与量化方法。

3.2 低层建筑群异常变形监测与风险评估方法

3.2.1 多尺度建筑变形监测方法

对于广域低层建筑群变形监测方法的总体研究框架如图 3.1 所示。将 PSI 测量技术与结构工程理论结合，并引入城市历史气温数据、地下水位数据、GNSS 监测数据、光学卫星影像、城市实景三维图像等大数据，最终实现“城市-片区-建筑”的多尺度城市建筑群变形监测与综合风险评估。这一方法体系的主要优势在于，历史存储积累的 SAR 卫星影像可以解决传统建筑结构健康监测中基线数据缺失的问题，城市大数据引入有助于开展建筑异常变形的溯源分析，建筑结构理论的引入可从更深层次分析建筑结构的使用风险。

方法总体流程如图 3.2 所示。在城市级广域尺度层面，利用 PSI 技术进行广域变形监测，并基于 GNSS 监测数据校验变形结果，之后综合地质、水文等信息对广域变形场进行解析，进而根据异常变形趋势实现风险区域的识别。有关 PSI 技术的详细说明见第 2 章。在片区级中域尺度层面，利用基于升降轨 SAR 影像融合分析和温度变形剔除的 IDW 插值法，构建异常变形区域的精细化连续变形场。在建筑级局域尺度层面，在连续变形场中提取建筑历史变形曲线，通过综合时序变形数据和建筑结构理论，开展建筑异常变形分析与风险评估。通过此种多尺度的变形监测，可从地质、水文、人为等角度出发，更为全面研判建筑异常变形的

产生原因,实现从“城市大范围风险区域筛查”到“风险区域异常变形深度分析”,再到“单体建筑风险定量评估”的实用化技术流程。

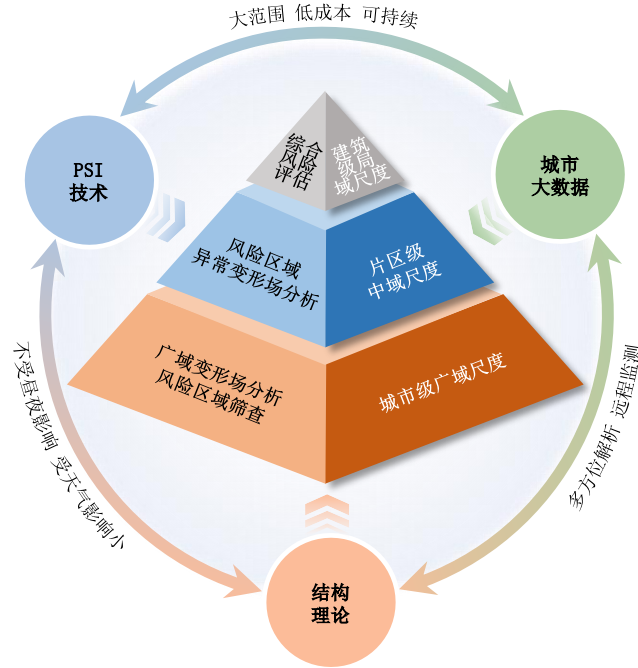


图 3.1 低层建筑群多尺度监测方法研究概念

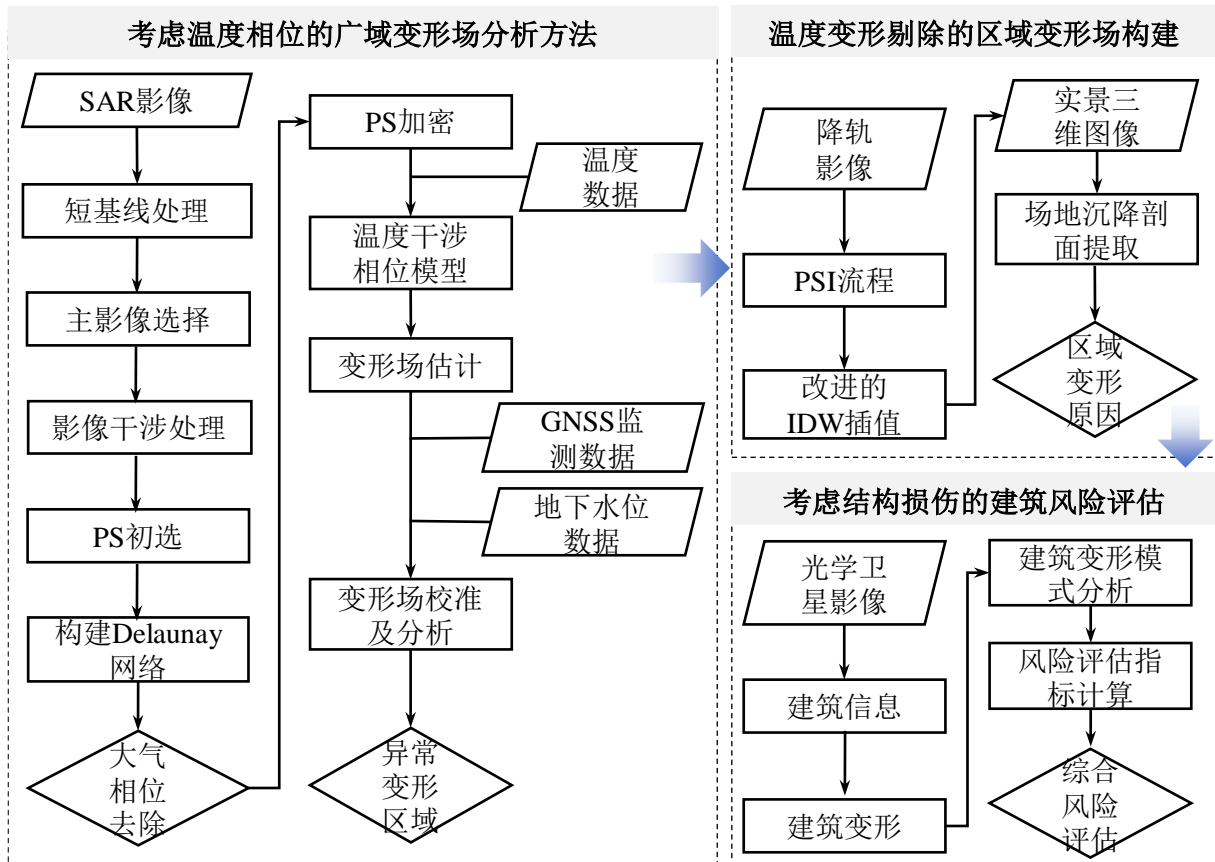


图 3.2 低层浅基础建筑群多尺度监测方法流程

3.2.2 基于温度变形剔除的 IDW 插值法

利用大范围、长周期的城市广域变形观测结果，可以初步识别变形趋势明显异常的风险区域。PSI 技术得到的是一个由诸多 PS 点构成的离散变形场，为对风险区域进行更加精细的变形分析，本研究基于反距离权重插值法 (Inverse Distance Weight, IDW) 获得区域内的连续变形场。该方法的核心思想是空间邻近相似性，即越接近的点变形值越相似，计算中通过距离的反比权重计算待插点的估计变形值。已有少数研究将该方法应用于建筑变形监测^{[59][158]}。然而，这些研究并未考虑建筑温度变形对区域变形场构建造成的影响。当区域内同时存在高层建筑时，在高层建筑立面上可能识别到一系列沿高度向分布的 PS 点。由于嵌岩深基础的设计，高层建筑上底部 PS 点始终稳定，高处 PS 点则随温度变化而产生大幅度波动变形，无法真实反映区域内浅基础建筑可能存在的持续性异常变形趋势。

为此，本研究提出基于温度变形剔除的 IDW 插值法，首先基于高度阈值和温度变形系数阈值，对高层建筑立面、大跨度建筑两端等具有明显温度变形的 PS 点进行剔除，再通过式 (3.1) 计算得到风险区域的连续变形场。式中， D_p 是待求点变形， S_i 是已知变形点与待求点的距离， D_i 是已知变形点的变形。在获取区域连续变形场后，可利用式 (2.21)、式 (2.22) 获取风险建筑区域竖向和东西向变形场。如图 3.3 所示，IDW 插值法可固定检索半径范围或固定临近点个数选取变形已知的 PS 点进行插值计算。考虑 PSI 技术获取的 PS 点在空间上分布不均匀，采用固定检索半径范围的方式插值可能导致部分地方出现空值，因此后续研究采用固定检索数量的方式选取参与插值的 PS 点。

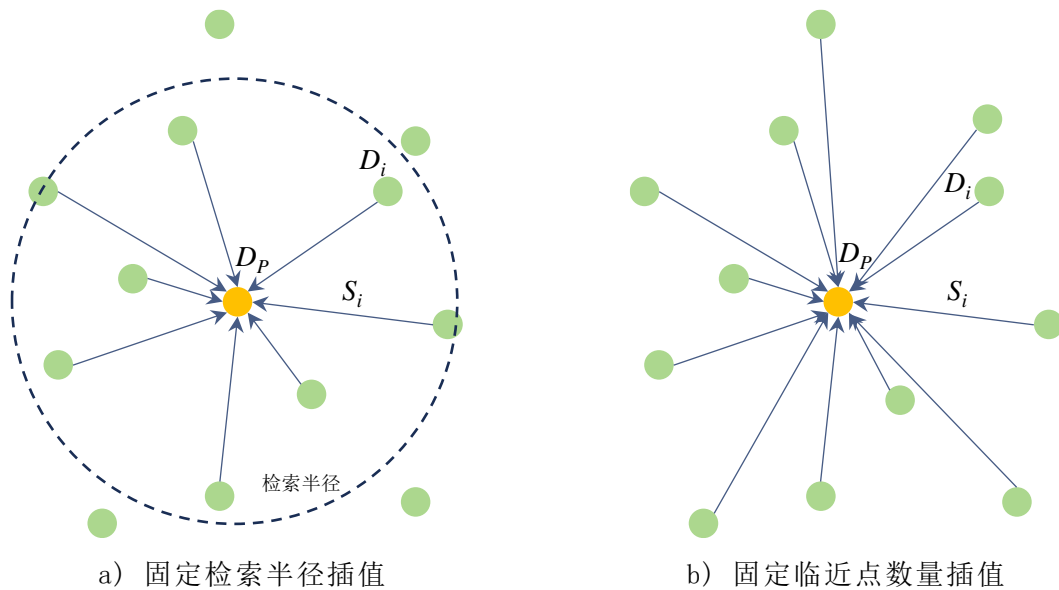


图 3.3 IDW 插值法平面示意图

$$D_p = \frac{\frac{1}{S_1}}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n}} D_1 + \frac{\frac{1}{S_2}}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n}} D_2 + \dots + \frac{\frac{1}{S_n}}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n}} D_n \quad (3.1)$$

3.2.3 低层建筑变形模式分析

低层建筑多为砌体结构或框架结构，在地基扰动等情况下容易发生异常变形并出现墙体开裂，从而影响建筑的正常使用功能，甚至造成结构承载能力下降。为更加细致评估低层建筑在异常变形情况下的风险，本文对浅基础建筑可能的纵向沉降变形模式进行系统性归纳。在此基础上，定义局部横倾角概念及计算方法以考虑结构扭转风险。最后，从结构损伤和整体变形两个方面出发，提出更加完备的建筑风险评估方法，提高基于星载 InSAR 技术评估建筑风险的准确性。

(1) 关于建筑的纵向沉降模式。依据沉降曲线的形态，本文将沉降变形分为图 3.4 所示的 4 种模式。图中， $d = f(x)$ 表示建筑沿纵向 x 坐标处的沉降量， L 表示建筑沉降区段的长度，下标“sag”和“hog”分别表示下凹型和上凸型沉降。沉降模式的特征与量化指标如图 3.4 所示。需要说明的是，发生沉降模式 I 与沉降模式 II 的建筑可能产生不利于结构安全的附加弯曲应力。不同的是，在沉降模式 II 下由于土层对建筑变形的约束作用，建筑弯曲变形的中性轴将位于结构底部^[159]，而模式 I 的弯曲中性轴位于结构中。针对这两类变形模式，在建筑结构形式类似的情况下，可简化 Finno 等^[160]提出的方法，利用图 3.4 (a)、(b) 所示的几何关系计算沉降曲线挠度比 ω_d 与 ω_d' 衡量建筑产生不利附加应力的风险程度。相较而言，沉降模式 III、IV 属于整体变形，较不易产生不利结构安全的附加应力。

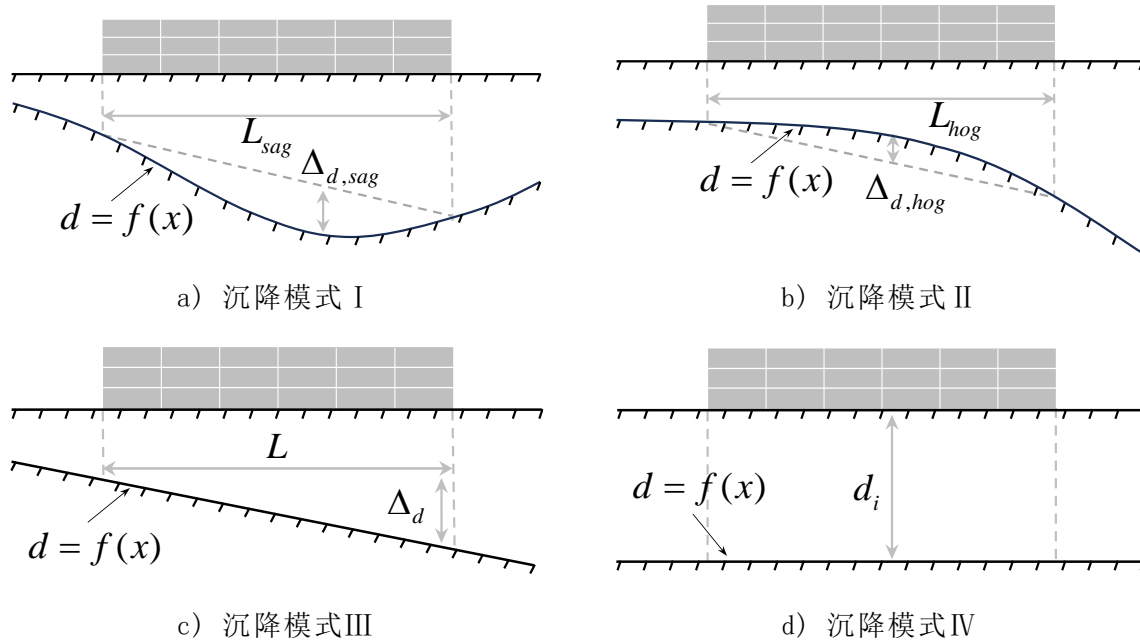


图 3.4 浅基础低层建筑沉降模式

(2) 关于建筑的横向倾斜模式。已有基于星载 InSAR 技术的建筑变形监测仅关注建筑的沉降结果。然而，对于长宽比较大的浅基础低层建筑，结构可能由于场地的不均匀沉降，导致沿纵向不均匀的横向倾斜。为此，本研究定义了图 3.5 所示的局部横倾角来分析建筑横向倾斜情况，局部横倾角通过式(3.2)计算得到。式中， θ_i 为局部横倾角， D_i 与 D_i' 为建筑上部不同横截面处的两侧竖向沉降值， B 为建筑宽度。由于已有研究表明，对于浅基础建筑，一方面建筑物自身刚度可以抵抗变形，另一方面建筑物在自重作用下会略微加剧地表的自由沉降，在两方面因素共同作用下，建筑物的沉降值与地表沉降接近^[161]。因此，本文直接利用建筑底部和周边地面上 PS 点的变形结果求解局部横倾角。

表 3.1 建筑沉降模式

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

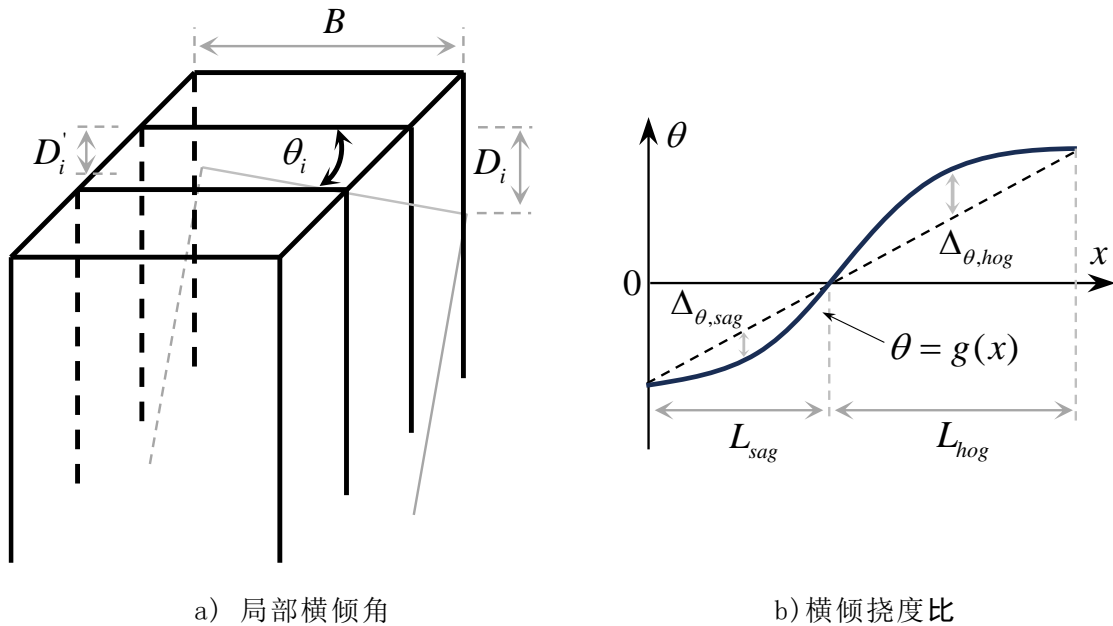


图 3.5 建筑横倾模式量化示意图

$$\theta_i = \left| \frac{D_i - D_i'}{B} \right| \quad (3.2)$$

表 3.2 依据横倾角曲线形态归纳了 3 类建筑横倾变形模式。表中， $\theta = g(x)$ 为横倾角沿纵向的分布曲线， θ 取向南或向东倾斜为正值。对于发生横倾模式 I 的建筑，结构沿纵向发生不均匀的横向倾斜，可能产生类似扭转的效应，由此加剧结构某些部位因纵向弯曲导致的不利附加应力。尤其对于砌体结构而言，其抗拉

应力能力较差，结构上的不利附加应力将显著加剧作为主要承重构件的墙体的开裂风险，进而导致结构承载能力严重下降。因此，对于结构形式相近的建筑，本研究借鉴沉降挠度比的思想，用横倾角曲线挠度 ω_θ 衡量其产生扭转附加应力的风险程度。由于沿建筑纵向多个截面的两侧竖向沉降差可能不同，因此对于单一建筑而言，在观测的最终时刻可得到多个横倾角值，进而绘制如图 3.5 (b) 所示的横倾角曲线，并计算横倾角曲线挠度比。换言之，在观测的最终时刻，通过提取建筑两条纵向侧边的沉降曲线，通过曲线不同点位沉降值相减并除以建筑宽度，即可得到建筑横倾角曲线。横倾模式 II 对应建筑产生整体横向倾斜，较不易产生不利附加应力。横倾模式 III 则对应了建筑不产生横向倾斜的情况。

表 3.2 建筑横倾模式

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

3.2.4 低层建筑风险评估方法

如 1.3.3 节所述，现有基于星载 InSAR 技术开展建筑风险评估的研究中，多通过变形量评估建筑风险，未充分考虑可能存在的结构损伤，因此风险评估结果可能存在一定的片面性。为此，本文将建筑风险评估分为“结构损伤风险”和“整体变形风险”两类。其中，结构损伤风险是指建筑结构主体产生不利附加应力的风险，例如弯曲、扭转等，这将直接影响结构的承载能力安全。整体变形风险是指建筑发生过大的整体变形，进而影响建筑正常使用功能的风险。例如，轻微的建筑整体均匀下沉可能不会对结构承载力安全造成过大威胁，但过大的整体均匀下沉可能导致水电管道、非结构构件等遭受破坏。

建筑风险评估指标如图 3.6 所示。为更加全面考虑建筑整体变形风险，此处补充 3 个整体变形指标，包括最大沉降量、最大横倾角及近期沉降。最大沉降量 d_{max} 和最大横倾角 $|\theta_{max}|$ 可直接从沉降曲线和横倾角曲线中提取。近期沉降 $\overline{\Delta}_d$ 取建筑近半年各点沉降增量的平均值，用于表征沉降进一步发展的趋势。建筑风险评估时各评估指标的占比如表 3.3 所示。考虑到不论是严重的结构损伤还是过大的整体变形在建筑实际使用中都是无法被接受的，因此本文将二者在风险评估中的占比均定义为 50%。结构损伤风险方面，纵向沉降曲线挠度比占比为 40%，横倾曲线挠度比占比 10%。主要考虑在于建筑横倾带来的扭转效应一般较为轻微，需要附加纵向弯曲风险才可能带来较严重的后果，因此横倾曲线挠度比设置了相对较低的占比。整体变形风险方面，考虑建筑未来变形可能存在不可预料的非线

性增大趋势，进而导致各项指标朝高风险方向发展，因而对表征未来变形风险的近期沉降量设置为 20%的较大占比，其它 3 项均设置为 10%。多栋建筑的相对综合风险值按式（3.3）确定。式中， R 代表风险程度， I 代表指标量值， P 代表指标占比， n 为指标数量，下标 i 和 j 分别为指标编号和建筑序号。

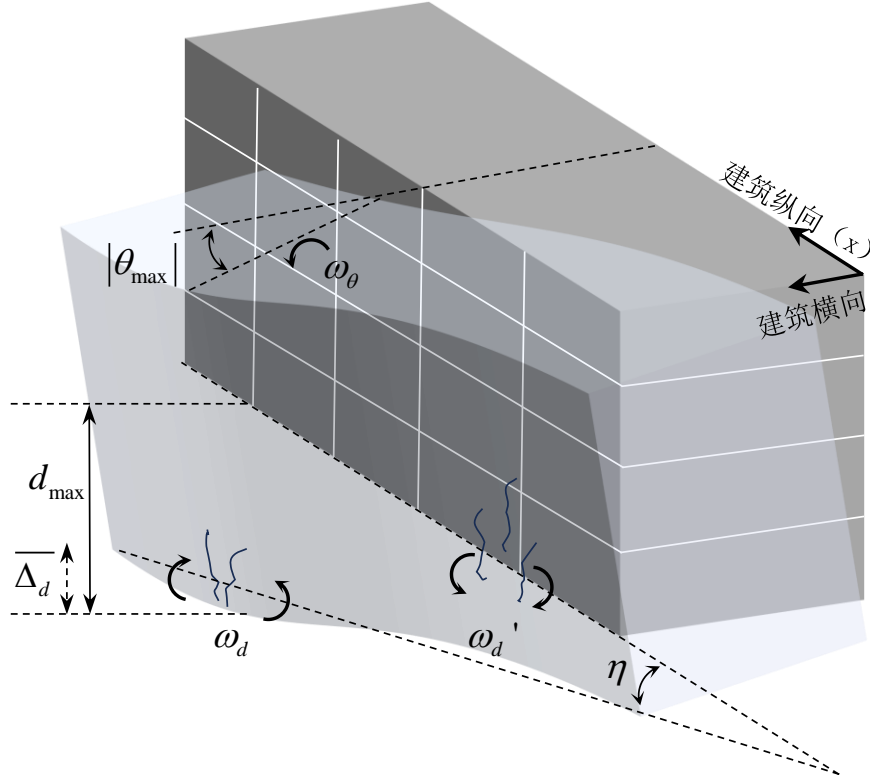


图 3.6 建筑风险评估指标

表 3.3 风险评估指标占比

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

$$R_j(\%) = \sum_i^n \left(\frac{I_{ij}}{I_{i,max}} \times P_i \right) \quad (3.3)$$

3.3 基于温度相关变形系数的高层建筑异常变形识别方法

3.3.1 高层建筑变形监测方法

高层建筑异常变形监测及识别方法研究流程见图 3.7。已有研究多利用地表

或低层建筑上的原位变形监测结果验证 PSI 技术的可靠性，但受温度、大气等因素影响，高层建筑顶端的变形监测精度还需进一步验证。因此，在方法流程中选用高层建筑顶端 GPS 测站记录的变形数据校验 PSI 技术的可靠性。综合绪论章节可知，高层建筑存在较为复杂的变形分量。同时，高层建筑结构形式可能为框架结构、剪力墙结构、框架剪力墙结构等，建筑材料包括钢结构、混凝土结构、钢混组合结构等，导致每栋建筑的温度变形特性存在显著差异。在此情况下，面对大量的高层建筑群变形监测，轻微的收缩徐变、倾斜变形可能因复杂的温度变形的干扰而被监测者忽略。为此，本文对高层建筑变形模式进行系统归纳，此后提出“温度相关变形系数”概念及计算方法，通过分析该系数的演化特征，实现建筑各种变形模式的识别，进而实现建筑异常变形的量化分析。

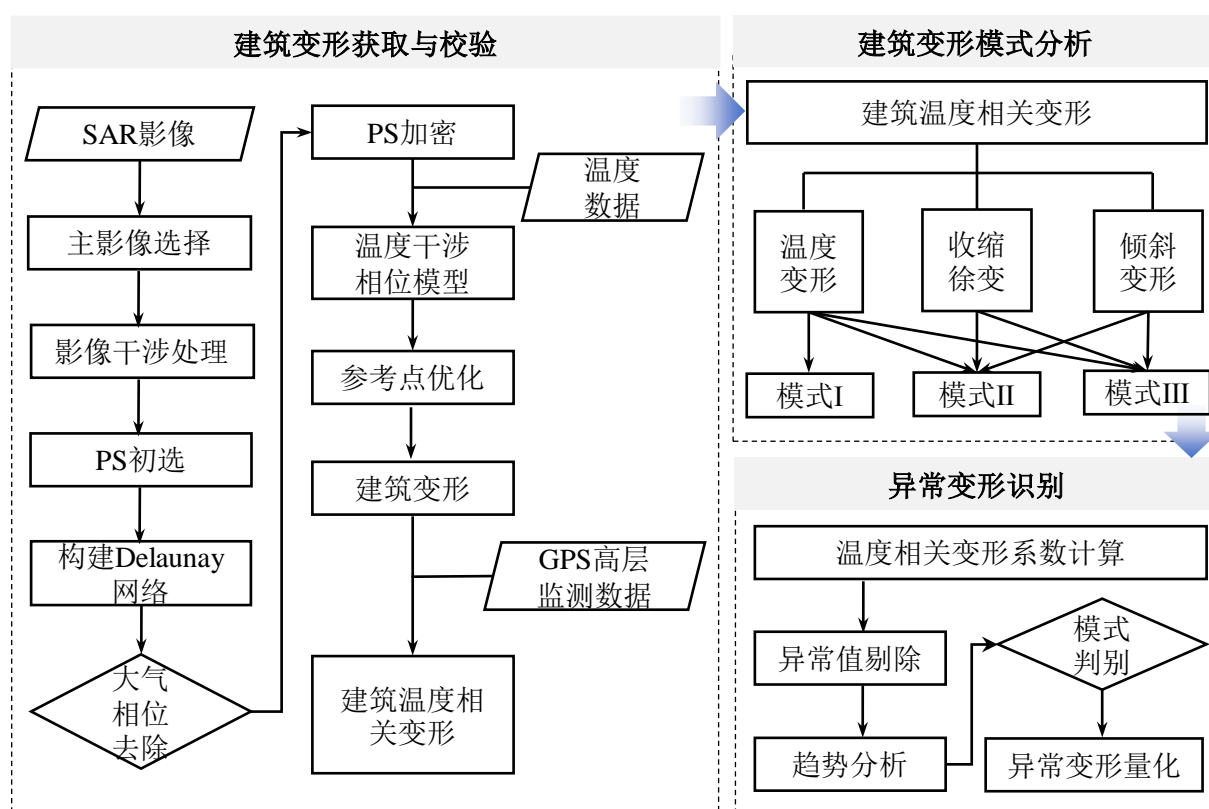


图 3.7 高层建筑异常变形识别流程

3.3.2 高层建筑典型变形模式

SAR 卫星观测视角如图 3.8 所示。当卫星两次过境期间建筑发生温度变形、倾斜变形等变形时，SAR 卫星可观测到沿 LOS 向的变形 D_{LOS} 。然而，SAR 卫星直接观测到的 LOS 向变形与建筑实际变形存在较大差异，这在一定程度上加大了建筑异常变形的识别难度。将 PSI 技术应用于高层建筑结构变形监测时，通常容易识别出沿建筑立面高度方向分布的 PS 点。由于高层建筑通常建立在深基础上，并利用岩层作为持力层，因而在温度或材料特性影响下，建筑的热膨胀和收缩变形将沿着顶部自由端累积。在此情况下，建筑立面上 PS 点的变形通常呈现出与

温度和高度高度相关的波动变形。这种波动的变形模式对轻微的异常识别带来了严重干扰，过大的波动变形甚至可能掩盖轻微的异常变形。因此，需要从 SAR 卫星独特的观测视角出发，深入分析建筑的典型变形模式，进而克服波动的温度相关变形对建筑异常变形识别的干扰，实现高层建筑异常变形的高效识别。

在上述分析论述基础上，本文将高层建筑总体变形模式归为 3 类，分别为：模式 I - 稳定模式、模式 II - 远离模式，以及模式 III - 靠近模式。由于 SAR 卫星观测到的高层建筑变形可能是多种变形耦合后的结果，纵使其存在与温度高度相关的变形特征，但并不能认为该变形就是结构设计中常定义的“温度变形”。因此，为表区分，在本文中将此类与温度高度相关的高层建筑变形称为“温度相关变形”。需要说明的是，由于 SAR 卫星重复周期大于十天，无法用高采样频率的方式监测到因地震、风荷载等作用导致的高层结构短时间弹性变形，因此后文变形模式中不涉及弯曲、剪切、弯剪等传统结构设计中考虑的结构变形形态。

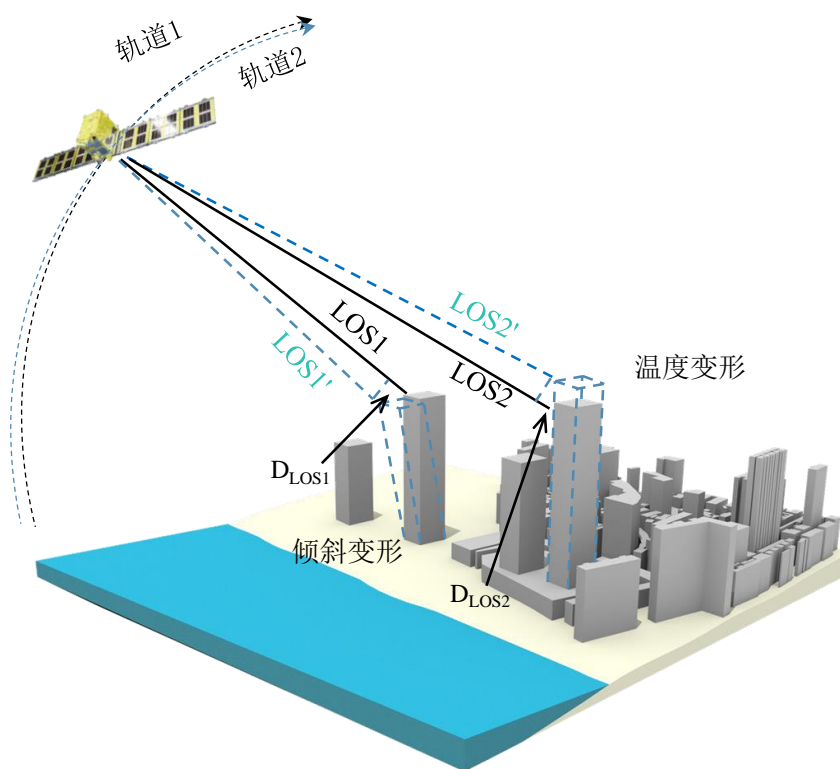
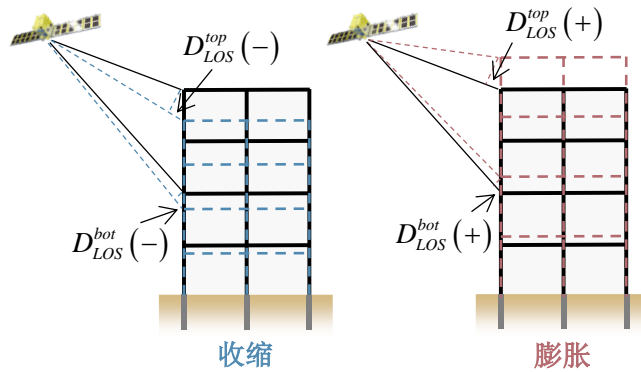


图 3.8 高层建筑卫星观测示意图

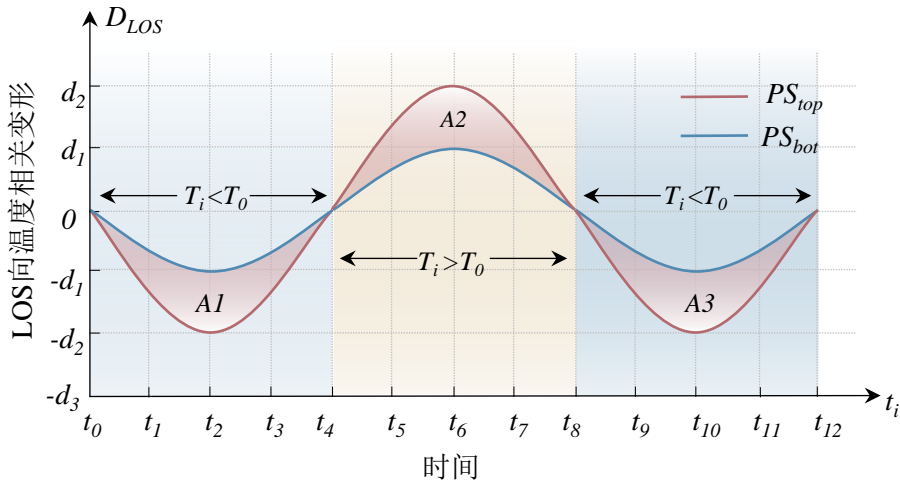
为简化问题，在深入分析高层建筑变形模式之前，本文先做出以下假设：（1）假设建筑立面上只有两个 PS 点，即 PS_{top} 和 PS_{bot} （下标“top”和“bot”分别表示建筑的顶部和底部），位于建筑立面上的一条直线上；（2）假设观测时间内温度变化是类似三角函数曲线般平滑的，建筑收缩或热胀变形的最大绝对值是相等的，温度升高的持续时间与温度降低的持续时间也维持相等。

本文将仅存在温度变形的建筑变形模式归纳为“模式 I - 稳定模式”。图 3.9(a) 展示了卫星视角下此类变形模式的特征。在温度升高和温度降低的时间区间内，

结构分别发生热胀和收缩变形， D_{LOS}^{top} 和 D_{LOS}^{bot} 分别表示建筑高点和低点的 LOS 变形。为便于后续分析与论述，本文中以靠近卫星的变形为正值，远离卫星的变形为负值。在这种变形模式下，虽然建筑顶端在温度作用下呈现出波动式变化特征，但建筑并未发生不可逆的异常变形。图 3.9 (b) 展示了该变形模式下 PS 点变形时间曲线的特征，其中 t_i 表示卫星影像的获取时刻， T_i 表示对应时刻的温度， T_0 为变形监测起点时刻的温度。易知，在该变形模式下两条 PS 变形曲线之间封闭区域 (A_i) 维持不变，即展现出稳定的变形特征。



a) 建筑变形特征



b) LOS 向变形曲线

图 3.9 高层建筑变形模式 I

本文将模式 I 变形与收缩徐变或远离卫星倾斜变形融合的变形模式归纳为“模式 II-远离模式”。如图 3.10 (a) 所示，由于建筑物向上的变形是累积的，这将导致 D_{LOS}^{top} 的绝对值大于和 D_{LOS}^{bot} 。因此，在模式 II 情形下，相较于建筑底部 PS 点的变形，较高位置 PS 点的变形曲线负趋势将更为显著。从图 3.10 (b) 中可见，在该变形模式下，区域 A_i 具有 $A_1 > A_2$ 和 $A_1 < A_3$ 的特征。需要指出的是，建筑物的整体位移不会影响区域 A_i ，因为它不改变两个 PS 点之间的相对变形。因此，通过

识别模式 II，能够自然地排除由于变形监测参考点轻微不稳定而导致的虚假建筑整体变形成分，这在一定程度上使得建筑变形监测参考点的选取条件得以放宽，提高了建筑变形模式识别的便捷性。已有基于 PSI 技术开展高层建筑变形的研究中，常选取建筑顶端单一 PS 点的变形曲序开展分析，这在短时间周期内可能将温度变形误判为异常变形，在长时间周期内则易受波动式温度变形的干扰。

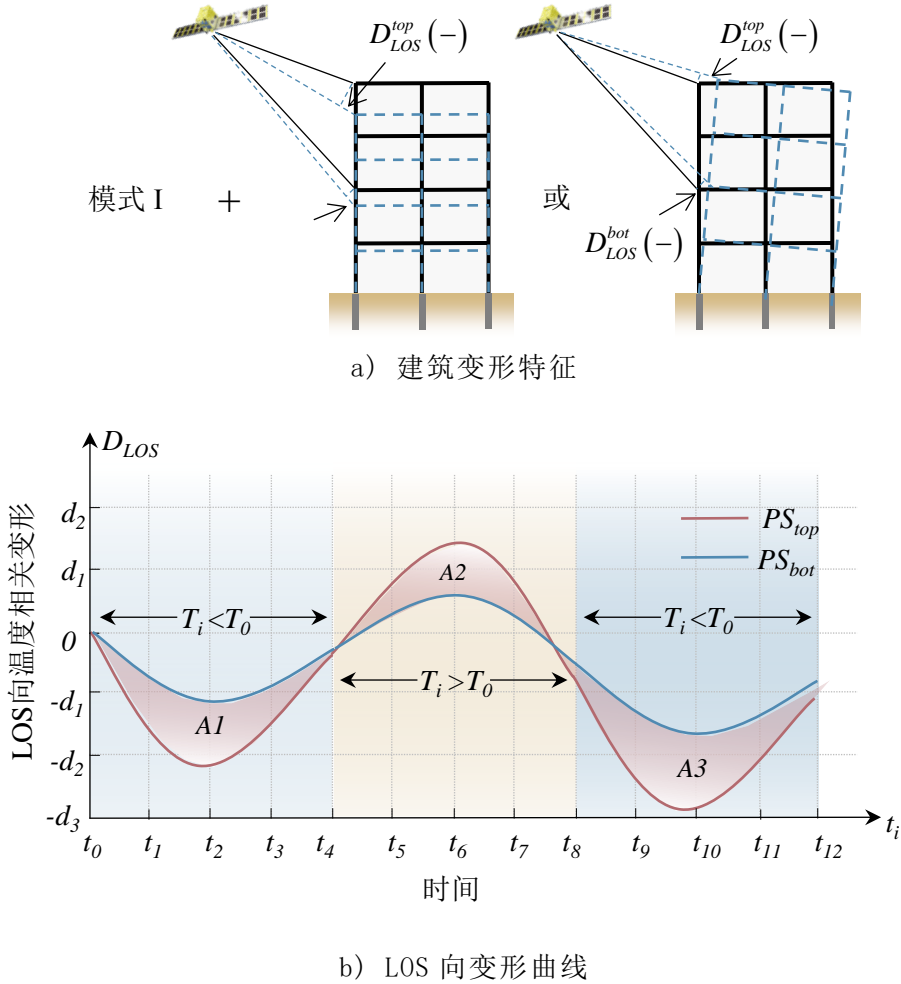
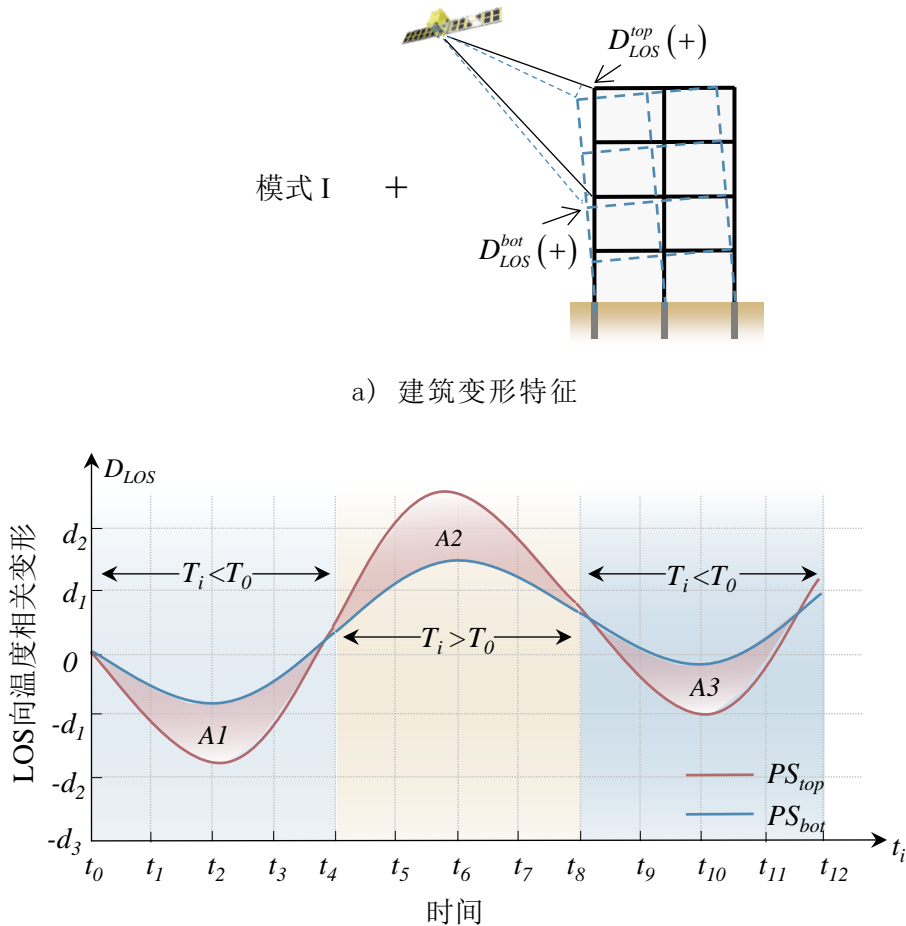


图 3.10 高层建筑变形模式 II

如图 3.11 (a) 所示，当建筑变形除模式 I 外还包含朝向卫星的倾斜变形时，将出现“模式 III-远离模式”变形。在这种情况下，图 3.11 (b) 呈现出与图 3.10 (b) 相反的结果，表现出 $A_3 < A_1$ 和 $A_2 > A_1$ 的特征。这是由于，在建筑因不均匀收缩徐变或地基不稳定导致朝向卫星倾斜时，在固定倾斜角下，建筑的水平向变形将近似与建筑高度成正比。与模式 II 类似，通过量化区域 A_i 的大小，模式 III 能够自然地排除由于变形监测参考点不稳定性而导致的整体建筑变形成分，这种不稳定性可能导致整个建筑物朝向卫星方向的虚假变形。同时，通过图 3.11 (b) 和图 3.10 (b) 的分析可见，高层建筑变形存在一定的复杂性，现有研究多利用单一 PS 点的变形论述高层建筑变形，这将影响变形解析结构的可靠性。例如，建筑顶端

PS 点发生负趋势的 LOS 向变形时，其可能是由于建筑整体远离卫星造成，亦可能由于建筑收缩徐变、远离卫星倾斜、降温收缩等原因造成，而透过单一 PS 点变形结果无法将这些变形区分识别。特别是不同建筑因为材料、结构等特性的不同，其在相同温度变化下导致的变形幅值可能不同，这进一步加大了高层建筑异常变形识别的困难。因此，此类问题的关键在于提出一种能够有效克服温度变形干扰的方法，从而在波动式变形曲线中高效识别出高层建筑是否存在异常变形趋势。



b) LOS 向变形曲线
图 3.11 高层建筑变形模式 III

3.3.3 温度相关变形系数及异常变形识别

如第 3.3.2 节所示，基于各种假设条件，准确识别 A_i 的大小可以实现变形模式的识别。然而，在实际场景中，第 3.3.2 节中引入的假设条件通常难以成立。其中，假设 (1) 的不成立影响较小。原因如图 3.12 所示，建筑在平面内可以被认为是刚度无穷大的，因此建筑同一平面内可能发生 x 或 y 向的平动，亦或是轻微的平面内转动，平面内两点之间的距离保持不变。又由于星载 InSAR 变形监测技术采样周期较长，即一般难以捕捉建筑短时内的平面转动，因此位于同一水平面

上的 PS 点可以同等地代表结构的横向变形，即假设（1）中高层建筑某一高度处的单一测点可以在一定程度上反映建筑的真实倾斜变形。然而，假设（2）的不成立则会对 A_i 的计算带来挑战。因此，本文提出“温度相关变形系数”的概念，以期越过 A_i 的计算识别建筑变形模式。

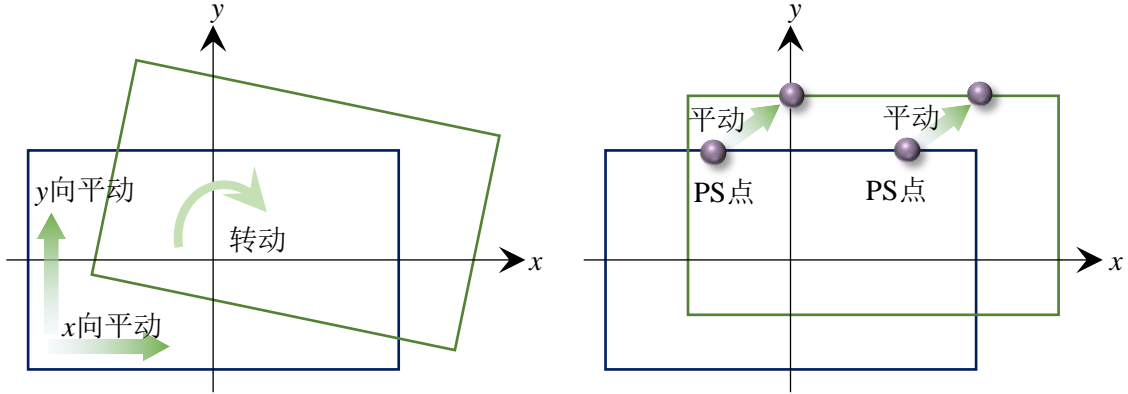


图 3.12 平面刚度无穷大示意图

首先，考虑仅存在 PS_{top} 和 PS_{bot} 点的情形。图 3.13 展示了计算温度相关变形系数的简单过程。在每个时刻 t_i ，如果可以取切片，可以提取出该时刻 PS_{top} 和 PS_{bot} 的 D_{LOS} 值，分别记作 D_{LOS}^{top} 和 D_{LOS}^{bot} 。在图中， T_0 和 T_i 分别表示 t_0 和 t_i 时刻的温度， H_{PS}^{top} 和 H_{PS}^{bot} 分别表示上部和下部 PS 点的高度。随后，温度相关变形系数 α_i 可以通过式（3.4）来定义。

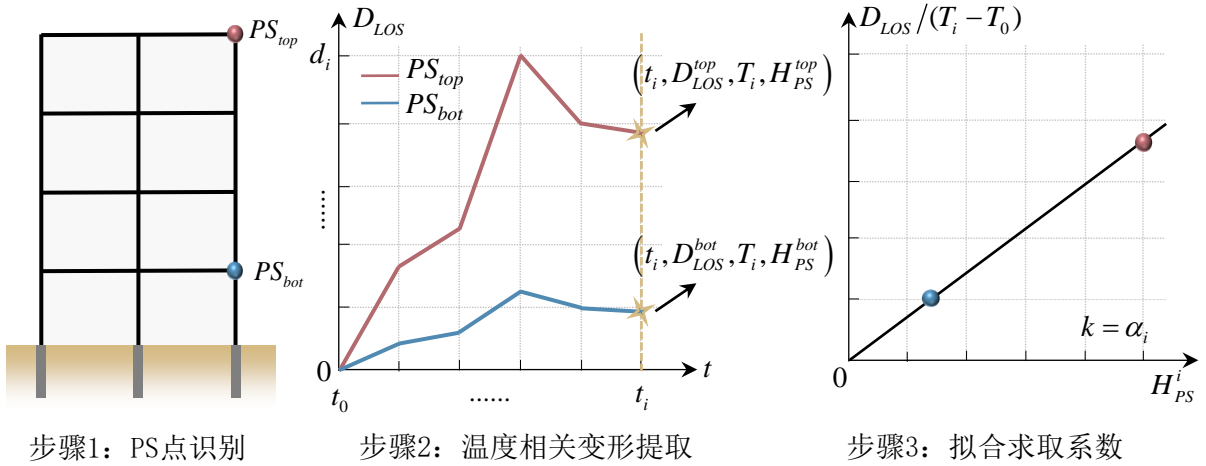


图 3.13 简化情况下温度相关变形系数计算步骤

$$\alpha_i = \frac{D_{LOS}^{top} - D_{LOS}^{bot}}{(T_i - T_0)(H_{PS}^{top} - H_{PS}^{bot})} \quad (3.4)$$

值得注意的是，经过式（3.4）的计算， α_i 在不同温度条件和建筑高度下是可比较的，因为在式中对 D_{LOS} 在温度和高度维度上都进行了归一化，这为不同建筑间的变形对比分析奠定了基础。然而，正如式（2.7）所示，在实际计算中单一 PS 点变形往往存在一定的噪声分量，同时温度数据的偏差、大气延迟相位的干扰等因素亦可能导致个别观测时刻变形的不准确性，这导致仅使用两个 PS 点求解 α_i

的结果较为离散。为此，本文继续提出一种改进算法。

图 3.14 展示了建筑立面上存在多个 PS 点的情形，以及求解温度相关变形系数 α_i 的方法。在图 3.14 中，每个 PS 点表示为 PS_i （其中 $i = 1, 2, \dots, N$ ），每个 PS 的变形表示为 D_{LOS}^i （其中 $i = 1, 2, \dots, N$ ），高度则表示为 H_{PS}^i （其中 $i = 1, 2, \dots, N$ ）。此时，高层建筑可能存在的倾斜变形与高度之间是近似线性相关的。同时，可近似假设温度变形及收缩徐变与高度之间也是线性相关的。之后，可以通过线性拟合方法来确定温度相关变形系数 α_i 。计算过程示意图如图 3.14 所示，计算方法如式 (3.5) 所示。线性拟合过程需遵循式 (3.6) 所示均方根误差较小原则，这导致线性拟合结果易受个别过大的异常变形值影响。因此，为避免拟合结果出现过大偏差，需要拟合前对明显错误的变形观测结果进行剔除。

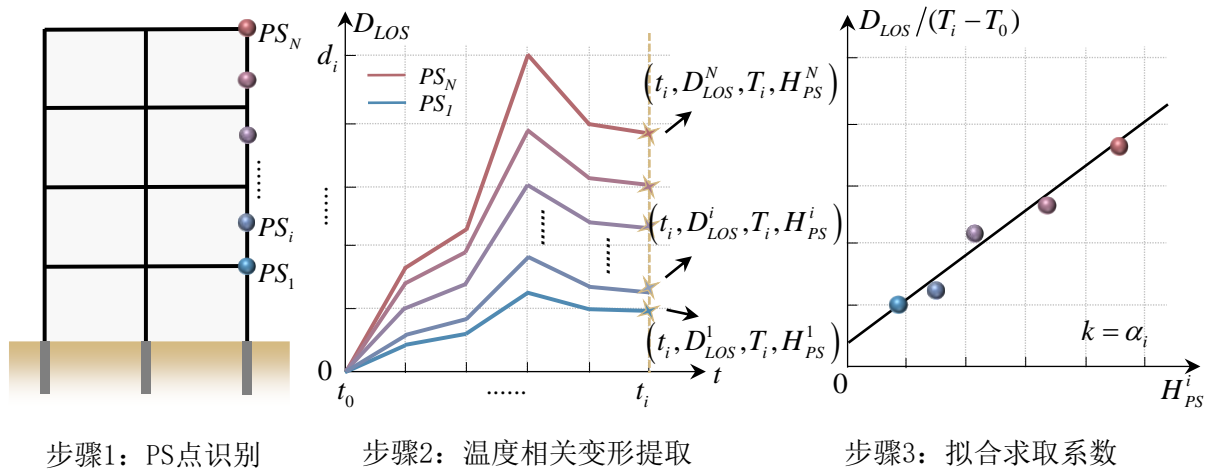


图 3.14 改进的温度相关变形系数计算步骤

$$D_{LOS}^i / (T_i - T_0) = \alpha_i H_{PS}^i + b_i \quad (3.5)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sum_{i=1}^N (D^i - f(H_i))^2 / N} \quad (3.6)$$

由于对于特定的 PS 点，等式 (3.5) 左侧项 $D_{LOS}^i / (T_i - T_0)$ 及高度 H_{PS}^i 是定值，因此将式 (3.5) 更为简洁地表达为：

$$D^i = \alpha_i H_i + b_i \quad (3.7)$$

为了更为深入分析建筑变形，不仅需要定性地识别变形模式，还需要定量地计算变形的大小。因此，本文继续提出了一种利用系数 α_i 定量估计建筑变形量的方法。通过对 α_i 的求解，当建筑变形符合模式 I 或经历整体沉降和抬升时， α_i 将保持稳定。在此，本文认为当 α_i 与其均值之间的绝对偏差 ($|\Delta\alpha|$) 普遍小于 $1.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 时，可将 α_i 视为处于稳定状态，因为该偏差小于建筑材料的热膨胀系数。 $|\Delta\alpha|$ 值可以通过式 (3.8) 计算：

$$|\Delta\alpha| = \left| \alpha_i - \sum_{i=1}^N \alpha_i / N \right| \quad (3.8)$$

对于 α_i 不稳定的建筑，可进一步地量化计算建筑异常变形值。易知，当建筑物经历模式II变形时， α_i 将在降温时间内持续减小，在升温期间持续增大。而在模式III的情况下， α_i 的变化趋势则相反。在这两种情形下，首先可以通过线性拟合确定 α_i 的变化率 k 。随后，对于一座高度为 H 的建筑，在变形监测时间区段 Δt 内的顶端 LOS 变形 D_{LOS}^{op} 可通过式 (3.9) 计算：

$$|k \cdot \Delta t \cdot H \cdot (T_1 - T_0)| = |D_{LOS}^{op}| \quad (3.9)$$

值得注意的是，由于第一个观测时刻对应的 α_i 值为零，变量 Δt 表示相对于第二个观测时刻的时间跨度。 T_1 和 T_0 分别表示第二观测时刻和第一观测时刻的温度值。

3.4 本章小结

面对现有研究中星载 InSAR 技术与建筑结构理论结合不足的现状，针对低层浅基础建筑群，本章将 PSI 技术与建筑结构理论相结合，并充分利用城市大数据，提出一套多尺度建筑变形监测与风险评估方法；针对高层建筑复杂变形特性，本章基于对建筑温度相关变形的深入分析，提出可避免温度变形干扰的高层建筑异常变形识别及量化方法。本章主要内容如下：

(1) 研究了低层浅基础建筑与高层建筑的典型变形模式。针对低层浅基础建筑，依据纵向沉降特征划分为 4 类典型模式，在此基础上定义建筑局部横倾角，归纳 3 类典型建筑横倾模式。针对高层建筑，从 SAR 卫星独特的观测视角出发，充分考虑建筑温度变形、收缩徐变及倾斜变形，归纳 3 种典型变形模式。

(2) 提出了低层浅基础建筑群多尺度变形监测与风险评估方法。首先，提出“城市-片区-单体”的多尺度变形监测方法，并结合城市大数据开展变形校验与分析。其次，提出利用基于温度变形剔除的 IDW 构建精细变形场。最后，提取单体建筑变形并提出综合风险评估方法，提高建筑风险评估的可靠性。

(3) 提出了高层建筑异常变形识别及量化方法。首先，系统性归纳高层建筑典型变形模式，提出温度相关变形系数的概念与优化计算方法。其次，基于温度相关变形系数演化趋势分析，提出高效识别建筑不同变形模式的方法。最后，基于温度相关变形系数变化率，提出建筑异常变形量化计算方法。

第4章 低层建筑群变形监测与风险评估

4.1 引言

低层建筑是城市中普遍存在的建筑形式，且往往具有较长的使用年限，存在较大的安全风险。在已有研究中多直接利用 PSI 技术获取的变形结果对建筑风险进行定性分析，其风险评估可靠性明显不足。为充分挖掘 PSI 技术在建筑风险评估中的应用潜力，同时验证本文第 2 章、第 3 章所述方法的可行性，本章将以地质灾害多发的中国台北市为例，介绍一个融合 PSI 技术与城市大数据的低层建筑群变形监测与风险评估实例。首先，将利用 GNSS 监测数据对 PSI 技术所获取的台北市变形场进行校验，并融入地质水文信息分析，以期深化对异常变形场的解析；其次，将分析台北市存在异常变形的风险区域，验证基于温度剔除的 IDW 插值法在构建区域精细变形场中的实用性，再综合区域施工信息和城市实景三维地图勘察进行风险原因解析；最后，将选择风险区域内代表性建筑进行相对风险评估，验证所提的综合风险评估方法是否有利于提高建筑风险评估的可靠性。

4.2 研究区域与数据处理

4.2.1 台北市与数据概况

本文选取地基整体稳定性较差的中国台北市开展监测方法验证。台北市位于台湾岛的北部，是中国台湾的经济和文化中心。台北市面积 271.8 平方公里，但人口超过 250 万，这使得建筑分布十分密集。如图 4.1 所示，台北市四面环山，整体位于台北盆地之中。从水文方面来看，由于台北市地处亚热带气候区，常遭遇台风等强降雨天气，导致其水系发达，且多发源于周围的山脉，包括有淡水河、基隆河、新店溪、大直河等。从地质方面看，台北市处在环太平洋大地震带上，地震活动频繁。此外，台北盆地近似一个半沟槽，填满了第四纪以来的沉积物。由于沉积物以砾石、砂、泥及其混杂物为主，导致台北盆地区域整体地质松软。因此，地下工程开挖、地下水位变化、强降雨等情况下，台北市极易产生较大幅度的地表异常变形。以往的监测结果曾表明，台北市在 2007 年 1 月至 2011 年 3 月期间台北市发生沉降^[162]，在 2012 年到 2013 年期间隆起^[163]，在 2013 年至 2020 年期间沉降和隆起则交替出现^{[164][165]}。在如此敏感的地质条件下，台北市常发生滑坡、地表塌陷等灾害，对密集建筑群的安全造成严重威胁。例如，2023 年 5 月，台北市信义区某建筑旁突发塌陷^[166]；2023 年 8 月，台北市大直区某建筑因受周围基坑施工影响，导致其整体沉陷近一层楼高度^[167]。

本研究收集的大数据概况如表 4.1 所示。其中，SAR 影像、气温数据用于获

取建筑变形, GNSS 监测数据、地下水位数据分别用于 PSI 变形结果校验和分析, 光学卫星影像和城市实景三维图象用于风险评估过程中的区域勘察和建筑信息获取。其中, SAR 影像来自 S1 卫星, 升降轨卫星的观测视角及各测站的位置分布如图 4.1 所示。为校核 Google Earth 在台北地区的光学卫星影像精度, 本研究重复量取了台北松山机场的跑道宽度, 结果处于 59.80m-60.20m 之间, 与实际值 60m 相比偏差小于 1m。

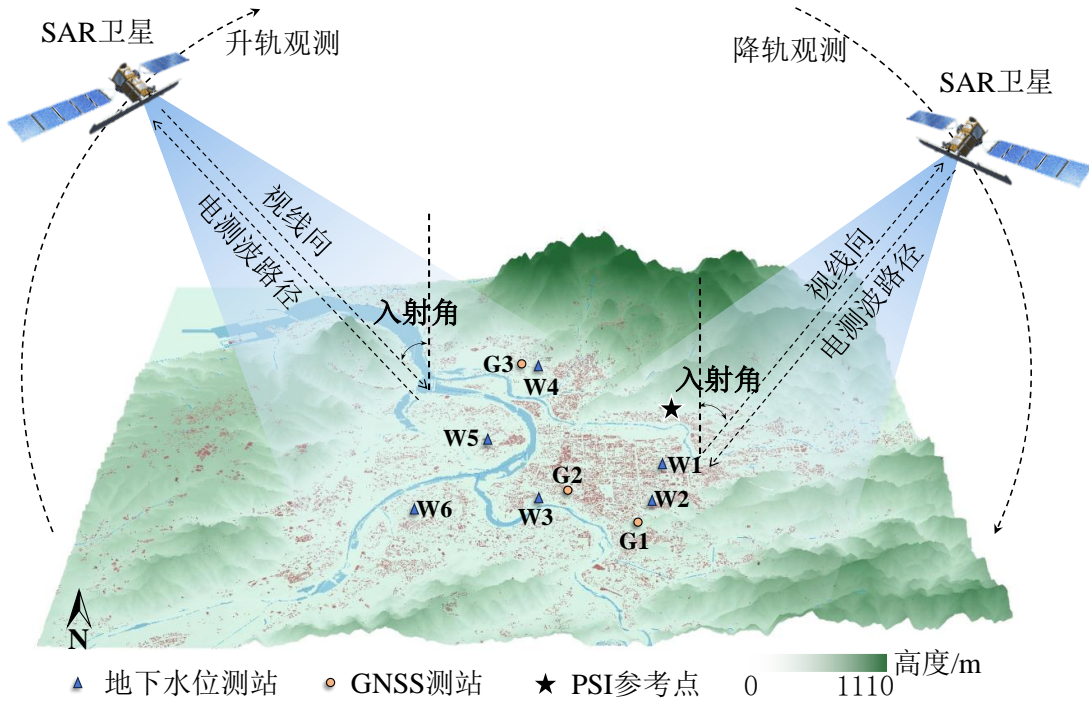


图 4.1 台北市地形与卫星观测示意图

表 4.1 大数据概况

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

4.2.2 SAR 影像处理

为提高各干涉影像对的时间相干性, 研究首先将 2019 年 1 月至 2024 年 2 月的 SAR 影像进行短时间基线处理。总影像集被划分为 5 个升轨影像子集 (SET-A1~ SET-A5), 和 1 个降轨影像集 (SET-D)。各影像子集覆盖的时间跨度及后续分析涉及的一条隧道施工时间如图 4.2 所示, 影像详细信息见附录 B 表 B.1~表

B.6。表中， B 为相对主影像的空间基线， t 为相对主影像的时间基线， T 为影像获取时刻的大气温度。此后，为提高 PSI 流程的解算精度，本研究先选择 0.75 的振幅稳定系数作为 PS 点初选的阈值，在大气干扰去除后将系数降低为 0.7 进行 PS 点的加密。为保证不同影像子集解算变形结果的连续性，本研究将变形参考点统一选择在图 4.1 所示的同一位置，并利第 2 章介绍的方法求解变形场。

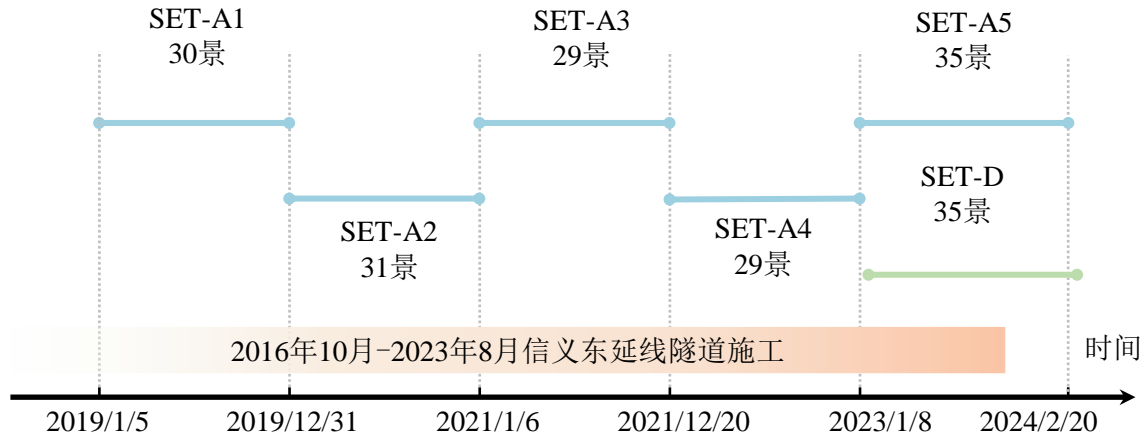


图 4.2 台北市影像子集

4.3 城市级广域尺度变形场分析

4.3.1 台北市广域变形结果与验证

图 4.3 展示了利用升轨影像求解得到的台北市 2019 年 1 月至 2024 年 2 月的分阶段广域变形结果，红色和蓝色分别代表远离和靠近卫星的 LOS 向变形。图 4.3 中每个带颜色的像素点为识别到的 PS 点，可见各时间段内 PS 点的密度均能够清晰表征台北市广域变形场。PS 点主要在建筑、桥梁、道路、河堤等处被识别到，构成的地表轮廓与光学卫星影像吻合良好，这说明了 PS 点经纬度坐标的准确性。如图 4.3 所示，台北市在 2019 年至 2020 年期间地表发生大范围远离卫星的 LOS 向变形，2021 年至 2024 年展现出靠近卫星的 LOS 向变形趋势，呈现出不稳定趋势。其中，2019 年至 2020 年的变形结果与 Lin 等^[165]的观测结果一致，这验证了 PSI 技术求解流程的正确性。

为进一步验证 PSI 技术变形求解的准确性，本研究利用图 4.1 中 3 个 GNSS 监测站记录的变形结果进行结果验证。为保证 GNSS 测站具有代表性，3 个测站分别选自台北市的北部、中部和南部，测站的详细信息如表 4.2 所示。表中数据提取时间为 2024 年 3 月 25 日。可见，3 个测站根据多年观测数据统计得到的南北向和东西向变形速率 v_n 与 v_e 十分接近。由于 PSI 技术求解的是相对于参考点的相对变形，因此， v_n 与 v_e 两个变形分量在 PSI 的变形结果中被自然剔除。此时，PSI 观测的地表竖向变形可近似由式 (2.20) 计算得到。由于 GNSS 测站在 2021

年之后的数据存在缺失，研究将 2019 年至 2021 年期间 PSI 计算的变形结果进行了对比验证。对比结果如图 4.4 所示，PSI 变形结果与 G1、G2、G3 测站所记录变形的平均偏差较小，分别为 2.23mm、2.76mm 和 2.54mm。偏差主要来源于 SAR 卫星观测时刻与 GNSS 测站数据的记录时刻不同，且 PS 点的位置与测站的位置并不完全重合。综合来看，PSI 技术与 GNSS 测站获取的竖向变形趋势十分吻合。

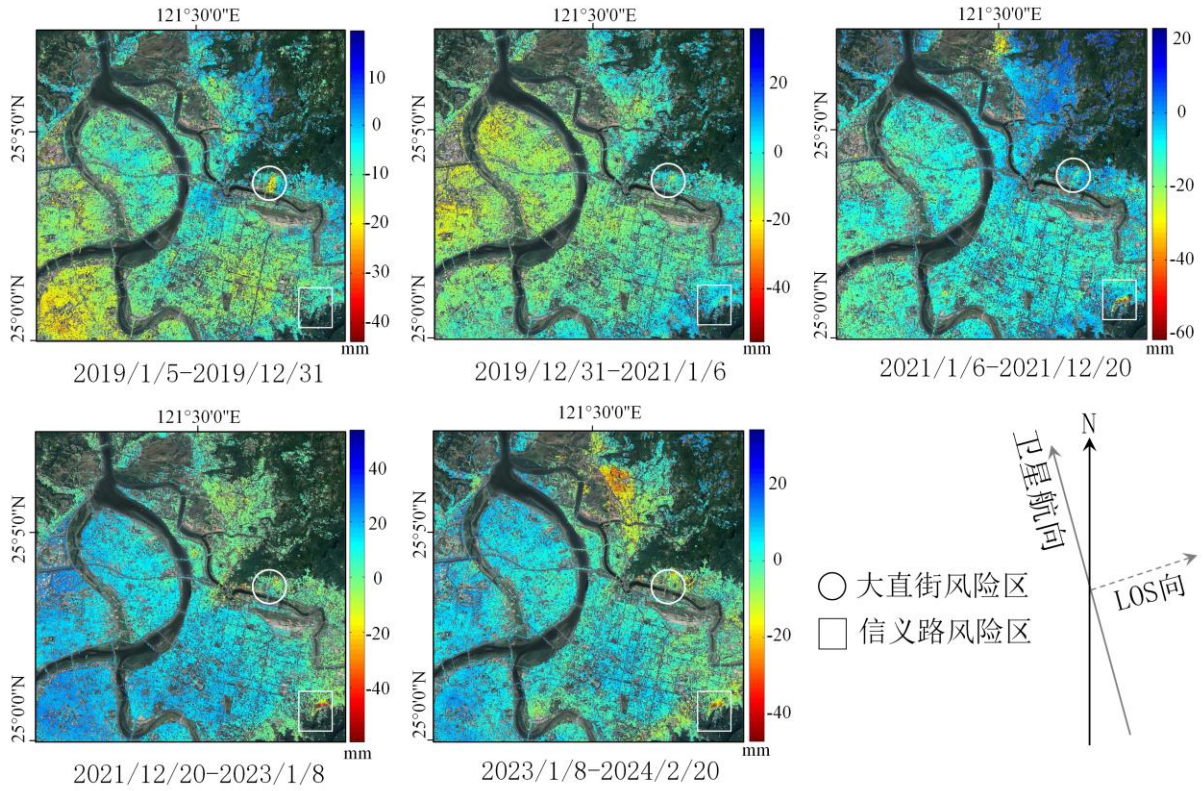
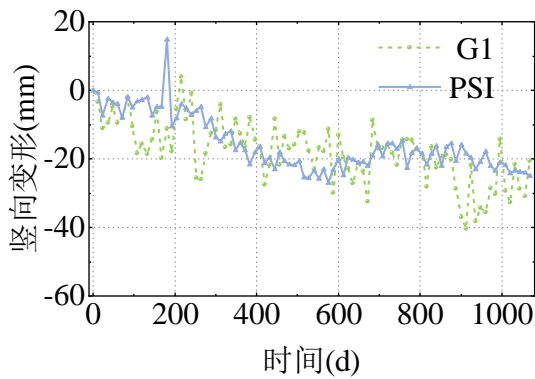


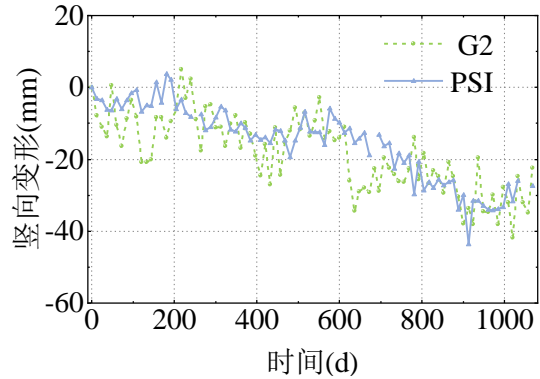
图 4.3 台北市广域变形场

表 4.2 GNSS 测站信息

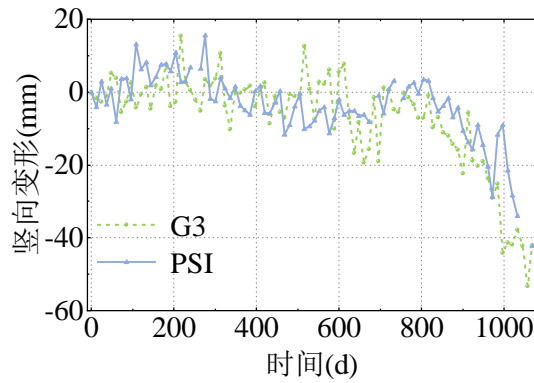
编号	坐标	启用时间	V_n (mm/y)	V_e (mm/y)
G1	25.0213° N, 121.5368° E	2015	-11.33	33.27
G2	25.0038° N, 121.5139° E	2012	-9.64	33.09
G3	25.1336° N, 121.4988° E	2005	-10.89	32.81



a) G1 测站对比结果



b) G2 测站对比结果



c) G3 测站对比结果

图 4.4 PSI 与 GNSS 的变形结果对比

4.3.2 地下水位与 PSI 变形结果对比

图4.5给出了各地下水位测站在2019年至2023年间，所记录的历史水位数据与临近PS点LOS向变形数据的对比结果。各地下水位测站的详细信息如表4.3所示。从图4.5可见，各测站地下水位变化与地表LOS向变形均展现出高度的正相关性。综合考虑台北市降雨量充沛且河系多从四周山脉向中心盆地汇聚。因此，可以推断4.3.1节所述台北市地表不稳定的变形趋势，是降水和地表水对地下水的动态补充，造成了地下水位在时空上的动态起伏，进而导致了地层中松软沉积层在时空上产生了大范围、长时间的不稳定波动。

4.4 片区级中域尺度异常变形场分析

4.4.1 风险区域概况

图4.3中分别用圆形和矩形标注了2个存在明显异常变形的风险区域。大直街风险区在观测的5年时间里呈现出持续沉降的变形趋势，该区域内的一栋建筑在2023年8月发生了严重的倾斜，导致建筑一层直接陷入地下^[167]。信义路风险区变形趋势与大直街风险区类似，在观测时间里持续沉降，可能面临较大风险。为深入评估该区域内的建筑风险，本文对该区域构建精细化变形场开展分析。

表 4.3 地下水位测站信息

测站编号	坐标	启用时间	井深(m)
W1	25.0039° N, 121.5580° E	2005	89.56
W2	25.0255° N, 121.5486° E	2005	50.00
W3	25.0203° N, 121.5043° E	2007	85.00
W4	25.1072° N, 121.4998° E	2005	59.00
W5	25.0606° N, 121.4881° E	1994	107.35
W6	25.0204° N, 121.4703° E	2005	79.00

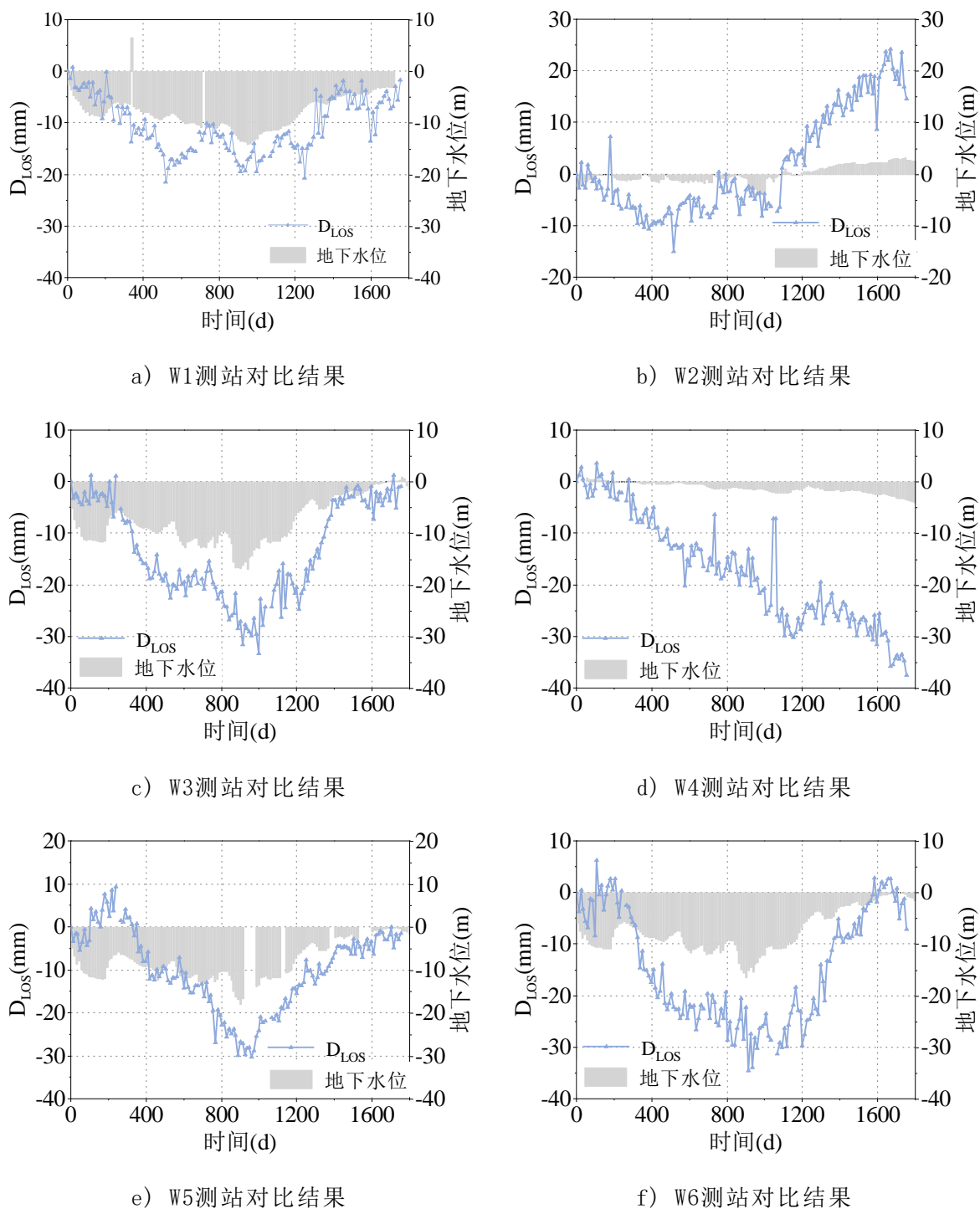


图 4.5 LOS 向变形与地下水位对比结果

基于光学卫星影像的勘察表明，该区域内多为低层浅基础建筑，因此适用于 3.2 节提出的分析方法。图 4.6 展示了该风险区域的概况，可见台北市“信义东延线”的 CR285 隧道施工标段从该区穿过。据公开信息可知，该施工段全长约 1.42 km，除车站、通风井等必要处采用明挖施工外，其余工段均采用盾构掘进的方式施工。该地区浅层土壤软弱，深层岩层坚硬，且地表施工区域狭窄。因施工难度较大，该工程于 2016 年开始施工，直至 2023 年 7 月末才完成隧道的盾构掘进作业。

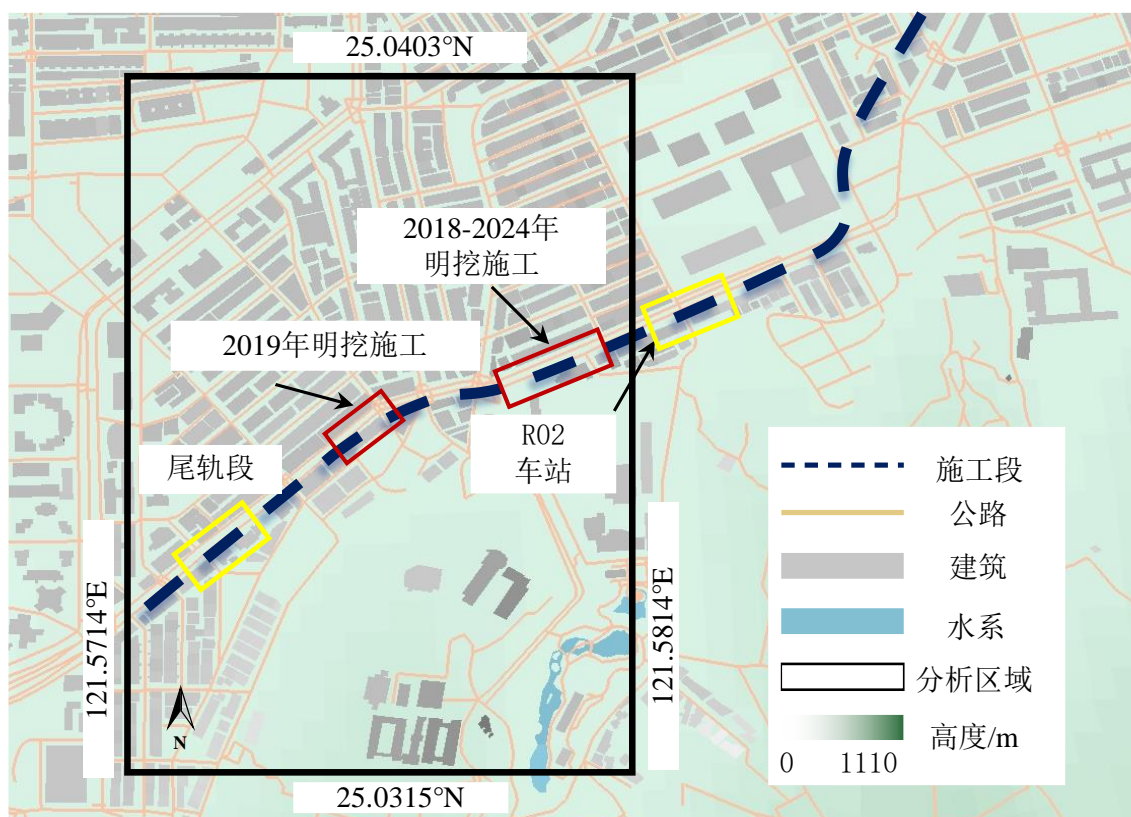


图 4.6 风险区域概况

4.4.2 精细化变形场分析

由于S1卫星降轨影像的缺失，研究无法利用升轨降轨影像融合的方法获取区域全过程的真实竖直变形。考虑隧道施工末期沉降较小，轻微的东西向变形可能成为LOS向变形的主导因素。因此，研究进一步选取了隧道盾构施工末期2023年1月至2024年2月的降轨影像数据，验证利用单一视角影像获取该区域竖向变形场的可靠性。由于图4.6分析区域周边分布大量高层建筑，在建筑立面上识别到PS点存在显著温度变形特征，这将对地基变形分析产生干扰。因此，利用3.2.2节介绍的基于温度变形剔除的IDW插值法，先对这些存在显著温度变形的PS点进行剔除，再插值计算得到区域内的东向变形场，结果如图4.7所示。通过提取变形结果可得，隧道施工末期两个时间段内场地的东向变形均值较小，仅为0.67mm和-2.17mm，这对建筑风险评估的影响较小。因此，其它时段的观测研究直接利用升轨影像计算该区域的竖向变形结果。

由于各影像子集的首尾影像互相衔接，因此对各子集计算所得区域变形结果进行叠加后可得信义路风险区变形场演变过程，结果如图4.8所示。为更加简洁说明问题，作者在表4.4中总结了区域内各时间节点的沉降特征。借助该变形场结果及Google Map平台存储的区域历史实景三维影像，可得该区域的沉降有以下特征：一是沉降中心不在隧道沿线的正上方，而主要集中于隧道沿线的北侧；二是沉降

场发展的时空起点与该隧道明挖施工的时空起点相对应，东西两端最大的沉降区域中心分别位于两个明挖施工区周边，且沉降发展时间均位于明挖施工之后；三是沉降带贯通的时间早于隧道贯通的时间，隧道于2023年7月完成盾构施工贯通，但地表沉降场在该时间点之前便已全线发展；四是隧道贯通后沉降场存在收敛趋势，2023年8月以后区域内沉降发展速度明显放缓。因此，综合图4.5所示台北地表变形受地下水位影响较大的分析，可以推断是由于隧道明挖施工改变了此处地下水的空间分布，加之隧道长期掘进作业对原本松散的地表沉积层造成扰动，最终在土层失水、压实情况下，地表发生了大范围沉降。这一推断同时可以说明，区域内两个较为明显的沉降中心中，东侧沉降中心的沉降发展更早、沉降更大的主要原因在于，东侧明挖施工活动的开始时间更早，且持续时间更长，因此对区域内建筑地基造成了更为严重的扰动。

借助Google Map平台存储的城市历史实景三维图像可以进行区域实景勘察。在观测时间内，勘察共发现了如图4.9所示的5处裂缝（C1~C5）。依据裂缝的发现和位置，裂缝被标记在图4.8的沉降场中。由于城市路面时常翻新，或时常因市政维修重新铺设，因此通过当下的实地勘察容易导致路面开裂问题被遗漏，这种利用历史城市三维影像开展区域勘察的方式则有利于发现区域内的历史开裂现象。图4.10展示了图4.8（i）中3个剖面的沉降值，并标注了剖面上裂缝与建筑的位置。由于城市路面由图4.10（a）可见，隧道沿线的北侧发展形成了两个明显的沉降漏斗，且东侧的沉降量明显大于西侧。

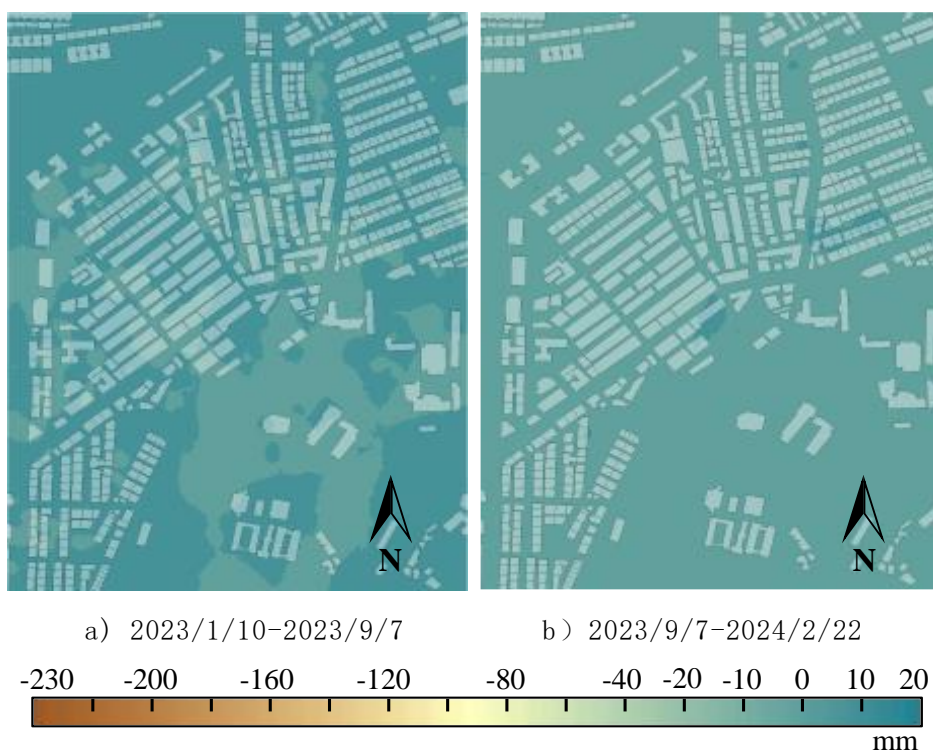
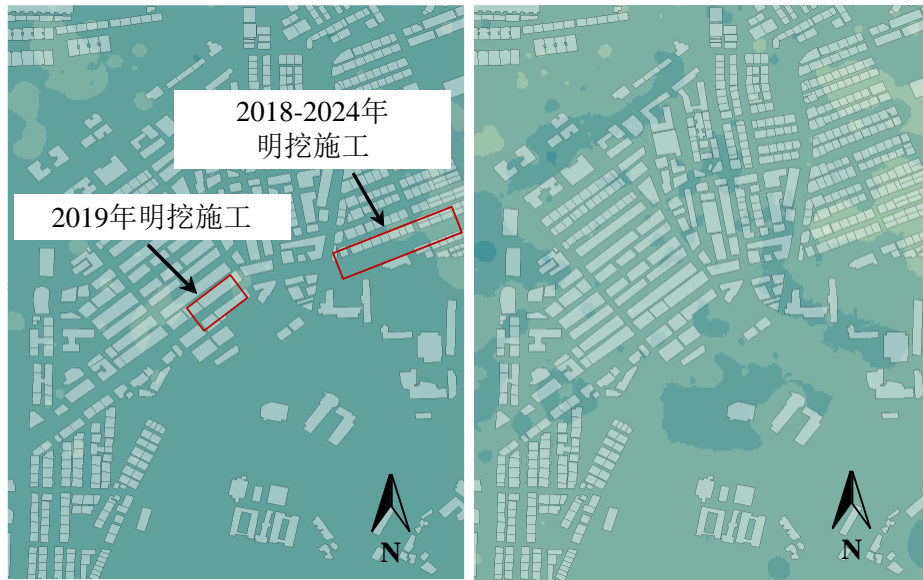


图 4.7 风险区域东西向变形场



a) 2019年12月

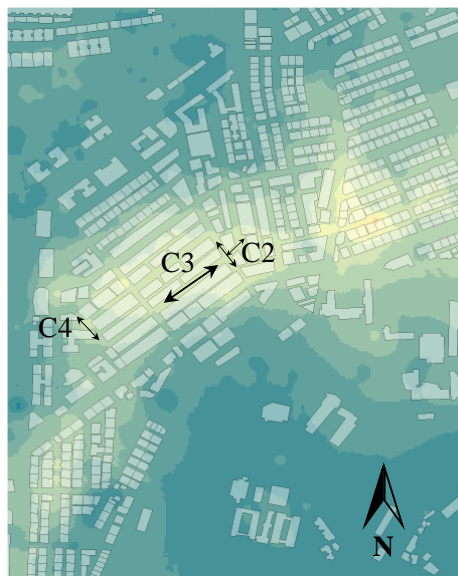
b) 2020年6月



c) 2020年12月



d) 2021年6月



e) 2021年12月

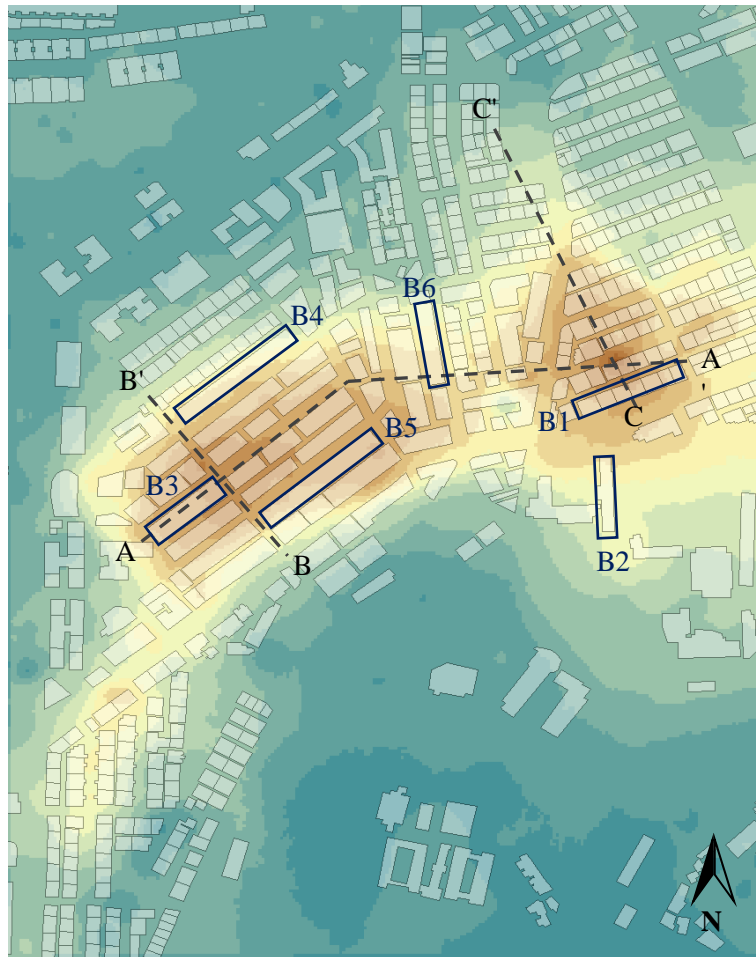


f) 2022年6月



g) 2022年12月

h) 2023年8月



i) 2024年2月

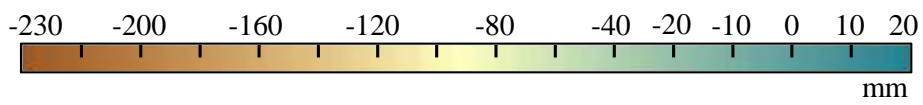


图 4.8 变形场演化过程

表 4.4 沉降场特征统计

时间	最大沉降(mm)	增量(mm)	特征
2019/12	-21.73	-21.73	局部片状沉降
2020/6	-43.25	-21.52	片状沉降扩散
2020/12	-66.64	-23.39	片状沉降扩散
2021/6	-90.60	-23.96	形成条带状沉降
2021/12	-125.12	-34.52	沉降条带蔓延、加深
2022/6	-166.38	-41.26	沉降条带蔓延、加深
2022/12	-194.72	-28.34	沉降条带蔓延、加深
2023/8	-219.09	-24.37	沉降条带蔓延、加深
2024/2	-230.35	-11.26	沉降带形态趋于稳定



a) 裂缝 C1 实景



b) 裂缝 C2 实景



c) 裂缝 C3 实景

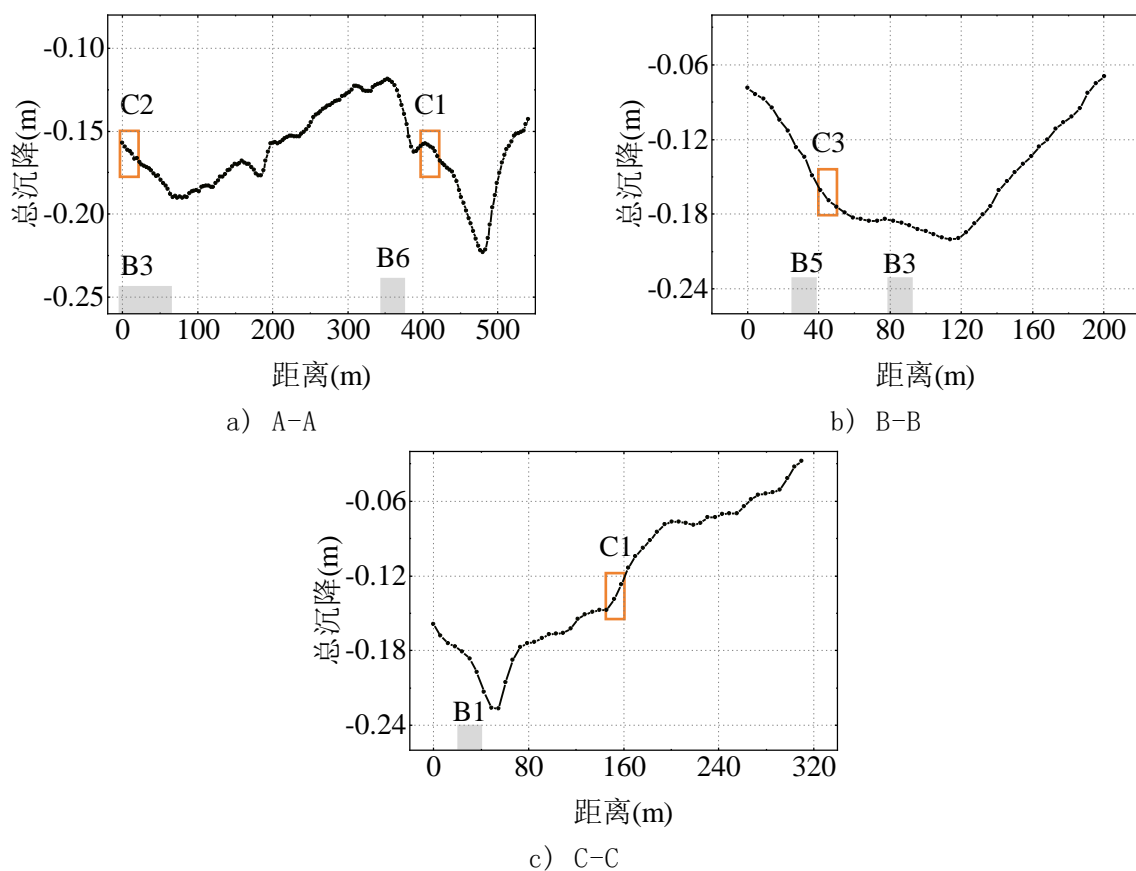


d) 裂缝 C4 实景

e) 裂缝 C5 实景

图 4.9 路面裂缝实景

表4.5进一步统计了各沉降剖面的特征信息。沉降漏斗的最大年沉降速率超过了45mm/y，若按Ezquerro等^[21]提出的砖石结构易损性曲线评估建筑损伤，沉降漏斗附近建筑的损伤概率超过了90%。然而，除新闻报道建筑B2具有明显的开裂外，在城市历史实景三维图像的勘察中并未发现其它建筑存在普遍的表现损伤。这说明，若使用单一的沉降速率评价建筑的结构损伤可能存在片面性。鉴于沉降后的场地最大坡度仅为1/366，说明虽然该区域的累积沉降量较大，但是形成的地表坡度并不大，这可能是大部分建筑未发生明显开裂损伤的原因之一。此外，明显可见C1、C2、C3裂缝的分布位置处于沉降曲线的拐点处，说明地面裂缝发展的主要原因是地表的坡度变化对沥青路面形成了一定的挤压或拉伸。



a) A-A

b) B-B

c) C-C

图 4.10 风险区域沉降剖面

表 4.5 沉降剖面特征统计

剖面	最大沉降量(mm)	最大沉降速率(mm·y ⁻¹)	最大坡度区间	最大坡度
A-A'	223	44.60	365m~387m	1/593
B-B'	200	40.00	9m~41m	1/436
C-C'	227	45.40	55m~73m	1/366

4.5 建筑级局域尺度变形分析与风险评估

4.5.1 风险建筑概况

为验证所提出风险评估指标的可靠性，研究分散选取了包括B1、B2在内的6栋层高相近但长宽比不同的建筑进行变形分析与风险评估。建筑位置见图4.8(i)，建筑实景如图4.11所示，建筑的基本信息见表4.6。此前，新闻报道在隧道施工期间B1与路面出现超过10cm的沉降差^[168]。图4.12(a)所示实景影像证明了这一报道，建筑B1的地坪2018年时高于路面，但到2022年时明显低于路面。此外，如图4.12(b)所示，在2023年期间发生了约50mm的沉降，结构上部出现明显开裂^[169]。



图 4.11 研究建筑实景



a) B1 沉降情况



b) B2 开裂与沉降情况

图 4.12 建筑 B1、B2 开裂与沉降情况

表 4.6 建筑信息

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

4.5.2 建筑变形分析

为更加深入分析风险区域内建筑的变形结果，从图4.8的沉降场中可提取建筑在各个时刻的沉降值并绘制沉降曲线。对于建筑沿纵向的沉降值，可取建筑纵向两侧边沉降值的平均值，建筑的横倾角按式（3.2）计算。建筑纵向沉降曲线结果见图4.13，建筑横倾角曲线见图4.14。

（1）建筑纵向沉降分析。从图4.13可见，所有建筑都具有明显的整体下沉趋势，但各建筑的沉降形态存在较大差异，这可能对建筑风险评估产生较大影响。同时，这种提取建筑总体沉降曲线的分析方式，还可较为直观看出来建筑的沉降速度。例如，在最后一个观测时间段内，所有建筑的沉降量均有所减小，这与隧道贯通后地面扰动减小相关。表4.7依据3.2节的分析，进一步统计了建筑的沉降情况。对B1而言，最终的沉降曲线具有明显的沉降模式 I 特征，即存在纵向弯曲变形。建筑B2沉降曲线具有明显的模式 II 特征，其在2023年期间观测到的平均沉降为54mm，这与新闻报道该建筑在2023年内发生了约50mm沉降接近。从产生附加应力角度考虑，可以推断B1产生了上部受压、下部受拉的不利附加应力产生。其未发现明显表面裂缝的原因在于，建筑底层外侧几乎没有沿纵向布置的填充墙，这在一定程度上释放了拉应力。对于结构上部的附加压应力，由于混凝土和砖砌体抗压强度较大，因此不易产生明显开裂。虽然B2的沉降挠度比较B1小，但由于其弯曲变形的中性轴位于结构底部，结构横断面上存在全截面受拉的附加应力，反

而可能存在更明显的开裂损伤。图4.12 (b) 所示的B2建筑表观开裂结果证明了这一推断。其裂缝产生的原因可能是结构上部受拉后，填充墙与柱子之间的附加拉应力超过了砂浆的粘结强度造成的。此外，在属于沉降模式III的4栋建筑中，B3、B5和B6发生整体向东的倾斜，B4则发生整体向西的倾斜。从结构不利附加应力角度考虑，这4栋建筑均不具有显著的结构损伤风险，其主要风险来自于过大的整体变形对建筑正常使用功能造成的影响。

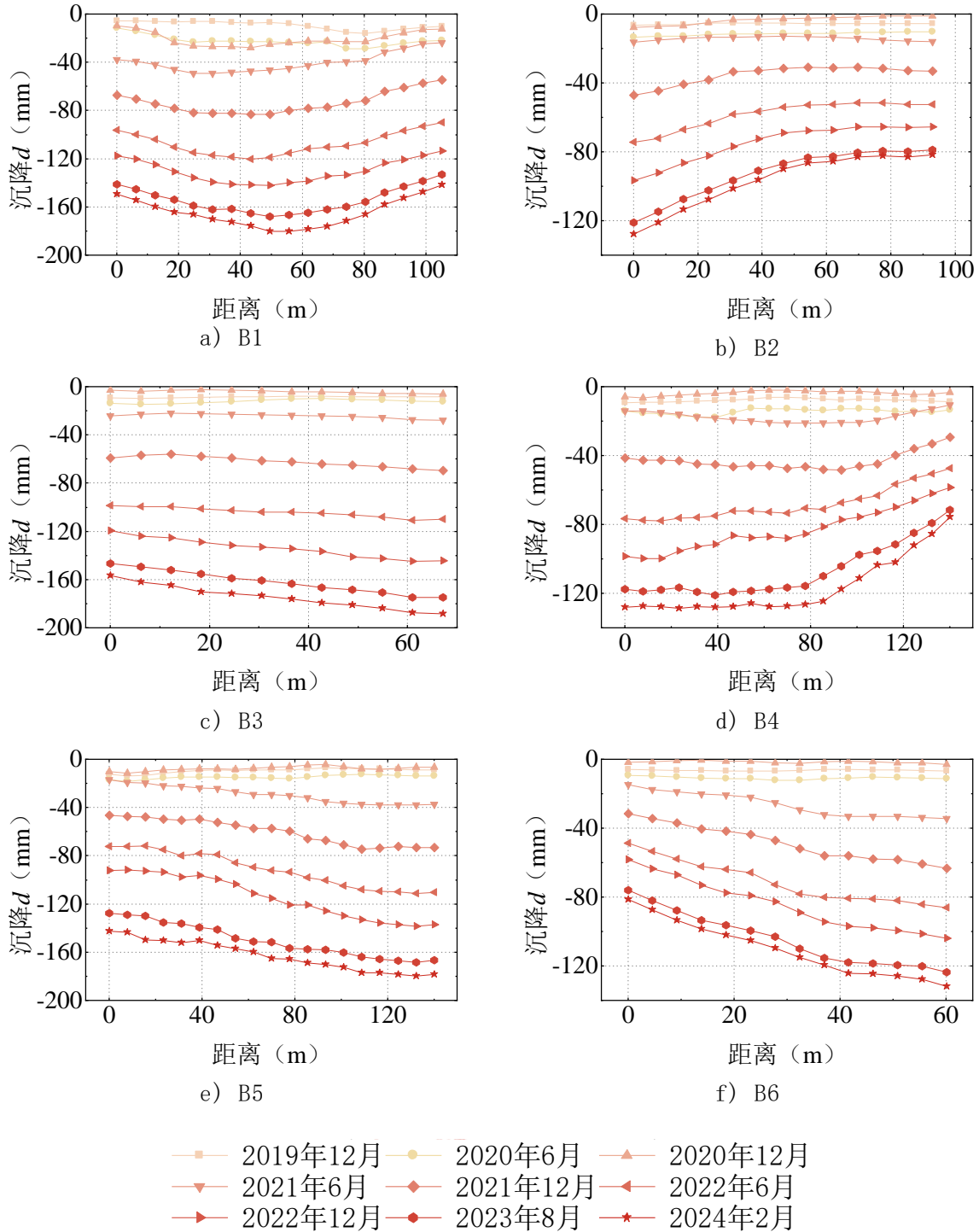
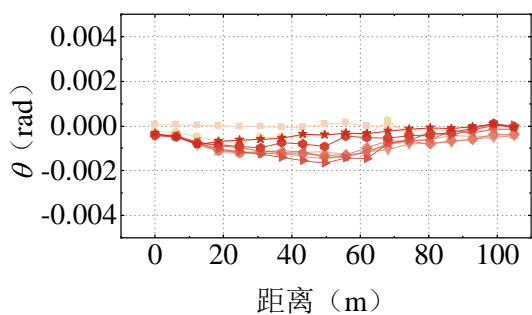


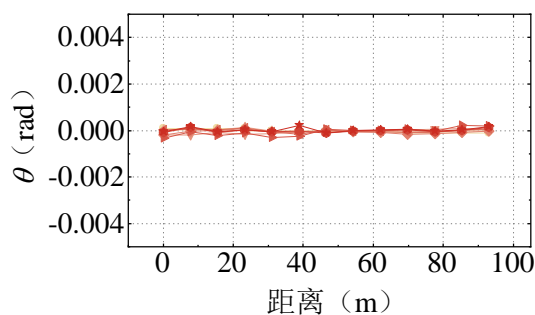
图 4.13 建筑纵向沉降曲线

表 4.7 建筑沉降变形结果

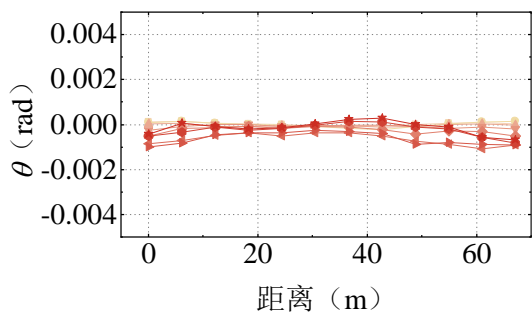
建筑编号	沉降模式	d_{\max} (mm)	$\overline{\Delta}_d$ (mm)	η (rad)	ω_d 或 ω_d'
B1	I +IV	180	10.53	1/17513	1/3038
B2	II +IV	128	7.27	1/2041	1/6649
B3	III+IV	188	12.81	1/2094	-
B4	III+IV	164	8.56	1/2036	-
B5	III+IV	178	12.62	1/4000	-
B6	III+IV	132	5.96	1/1176	-



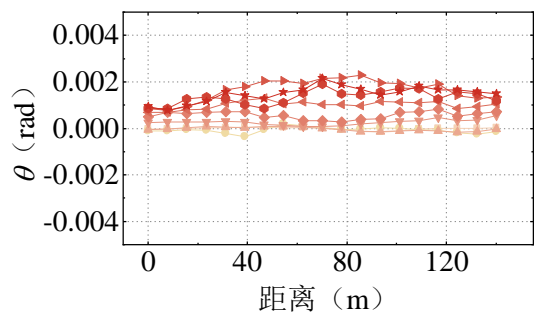
a) B1



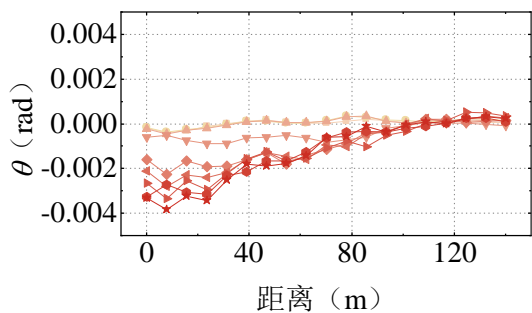
b) B2



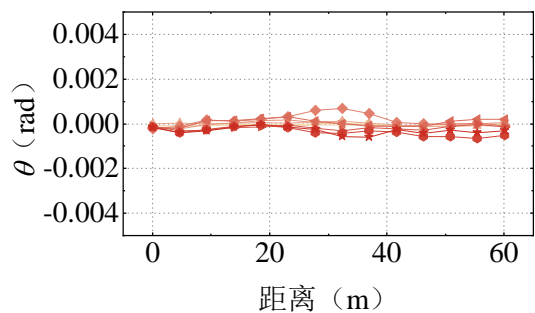
c) B3



d) B4



e) B5



f) B6



图 4.14 建筑局部横倾角曲线

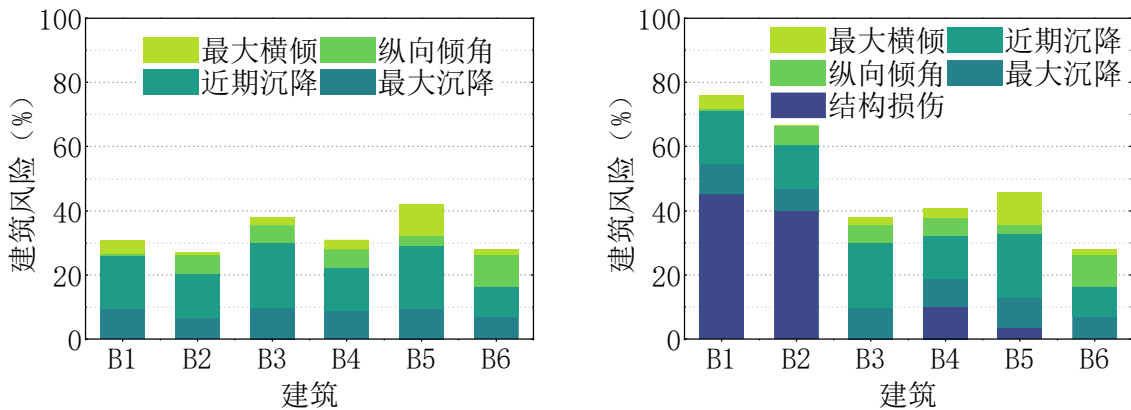
(2) 建筑横向倾斜分析。依据 3.2 节的定义，表 4.8 统计了横倾角相关的变形指标。可见，所有建筑的横倾角均较为轻微，这可能是区域内建筑未发生显著外观开裂的原因之一。本文进一步对最大横倾角大于 1/1000 的建筑建筑计算横倾挠度比，这一量级的倾角可使宽度大于 10 米的建筑在横向两端产生厘米级的沉降差。从结果可见，虽然 B5 发展了较大的横倾角，但最大横倾挠度比却较小。这再次说明了单一指标评估风险的局限性。此外，B2、B3 与 B6 的最大横倾角均小于 1/1000，这近似符合横倾模式 III 的特征，意味着建筑几乎不存在横向倾斜。

表 4.8 建筑横倾结果

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

4.5.3 建筑风险评估

6 栋建筑在结构形式、层高等方面均较为相近，因此适用于第 3 章提出的综合风险评估方法。根据表 4.7、表 4.8 的计算结果，利用式 (3.3) 可计算出建筑的风险结果，结果如图 4.15 所示。图中，不考虑结构损伤的风险评估方法是已有基于星载 InSAR 技术开展建筑风险评估的常用方法。从评估结果可见，图 4.15 (a) 中不考虑结构损伤的风险评估方法，将导致新闻报道损伤和变形明显的 B1、B2 两栋建筑的风险程度被严重低估，而考虑结构损伤风险后的图 4.15 (b) 则能很好识别出这两栋建筑的高风险。这表明，本研究提出的建筑变形风险评估指标可以有效克服已有方法的片面性，提高基于星载 InSAR 技术开展建筑风险评估的可靠性。



a) 不考虑结构损伤风险

b) 考虑结构损伤风险

图 4.15 建筑结构风险评估结果

4.6 本章小结

本章将第3章所提相关方法,应用于中国台北市低层建筑群变形监测与风险评估。证明所提方法有助于从多方面分析建筑因异常变形导致的风险,并提高现有基于星载InSAR技术进行建筑风险评估的可靠性。相关方法的应用有望加强城市建筑群抵抗潜在风险的韧性,并为未来城市建设大范围、低成本、可持续的建筑群变形监测及风险预警体系提供理论依据和实践经验。主要结论如下:

(1) 提出并验证了城市级广域尺度变形监测与解析方法的可靠性。一方面,通过对SAR影像集进行短时间基线处理,并采用考虑温度的干涉相位模型,有效保证PS点密度和较高变形精度。另一方面,引入城市大数据揭示城市大范围变形场的产生原因与演变趋势,有效识别变形趋势异常的潜在风险区域。

(2) 提出并验证了片区级中尺度精细化异常变形场构建与解析方法的可靠性。一方面,利用基于温度变形剔除的IDW插值法,获取风险区域的精细化变形场。另一方面,综合城市大数据信息,从人为因素、自然因素等的影响出发,深入解析风险区域异常变形场的产生原因。

(3) 提出并验证了单体低层浅基础建筑综合风险评估方法的可靠性。一方面,在考虑宏观变形的同时充分考虑建筑结构的变形模式,克服了利用单一宏观变形指标衡量建筑风险所存在的片面性。另一方面,区分建筑的整体变形风险与结构损伤风险,有效提升了建筑风险评估的合理性与准确性。

第5章 高层建筑变形监测与异常变形识别

5.1 引言

在已有利用 PSI 技术开展高层建筑变形监测的相关研究中，大多仅对建筑的温度变形、变形趋势等进行定性分析，尚未提出高效的异常变形识别方法，在变形分析时受季节性温度变形影响大。为此，本章将以高层建筑密集的长沙市为例，利用第 2 章、第 3 章所述方法克服温度变形的干扰，提高高层建筑异常变形识别效率。首先，为提高 PSI 技术求解高层建筑变形的精度，将对建筑环境历史温度数据进行校验，并利用包含温度相位的干涉模型进行变形反演；其次，将利用高层建筑上 GPS 测站记录的变形数据，对所用 PSI 技术获取的变形结果进行验证；最后，将选取长沙市 9 栋具有代表性的建筑开展变形模式识别，并基于对温度相关变形系数的计算分析，对建筑变形模式进行深入对比分析，验证本文第 3 章所提方法在高层建筑异常识别中的高效性与实用性。此外，文章还将用 Tomo-PSInSAR 技术结合更高分辨率的 CSK 影像，解析长沙地区高层建筑的变形，进一步探索高分辨率 SAR 影像在高层建筑变形监测中的应用潜力。

5.2 温度与变形监测精度校验

5.2.1 温度数据校验

高层建筑在变化的环境温度作用下，由于材料的热胀冷缩效应，会沿纵向产生较为显著的温度变形。因此，如式 (2.15) 所示，在利用包含温度相位的干涉相位模型解析高层建筑变形的过程中，必须输入可靠的温度数据才能确保输出变形结果的可靠性。一般而言，建筑物周围的温度可以通过历史气象预报或附近机场的气象站获取。本研究将来自欧洲天气气象预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 和长沙黄花国际机场气象站的温度数据，与建筑原位温度传感器获得的温度数据进行比较，从而选择最适合高层建筑变形解算的温度数据。温度传感器安装在中国长沙市的晟通大厦，建筑位置如图 5.1 所示。该建筑采用框架剪力墙结构，包括 A 塔 (高度 279.65 米，59 层) 和 B 塔 (高度 219.65 米，49 层)。本研究中，选取 A 塔 4 层、10 层、25 层和 31 层的平均温度作为实际温度值。机场温度数据来自黄花国际机场，而 ECMWF 数据则通过直接定位晟通大厦的位置选取。传感器详细安装位置见图 5.1 中的红色三角。关于传感器仪器及晟通大厦施工过程的更多详细信息可参见 Zhou 等人的研究论文^[170]。所选的温度对比时间为 GMT+8 时区的下午 6 点，这对应于 Sentinel-1 卫星过境长沙市区的成像时间。由于本研究是在晟通大厦 A 塔施工阶段进行的，因

此仅能获取 2023 年 1 月至 6 月期间的完整传感器温度数据。如图 5.2 (a) 所示, ECMWF 和黄花国际机场的温度在趋势上与传感器记录的温度均高度一致。图 5.2 (b) 展示了来自黄花国际机场和 ECMWF 温度数据的偏差分布, 结果可见 ECMWF 数据的整体偏差较小。因此, 本研究选择 ECMWF 温度数据用于后续的 PSI 变形分析。

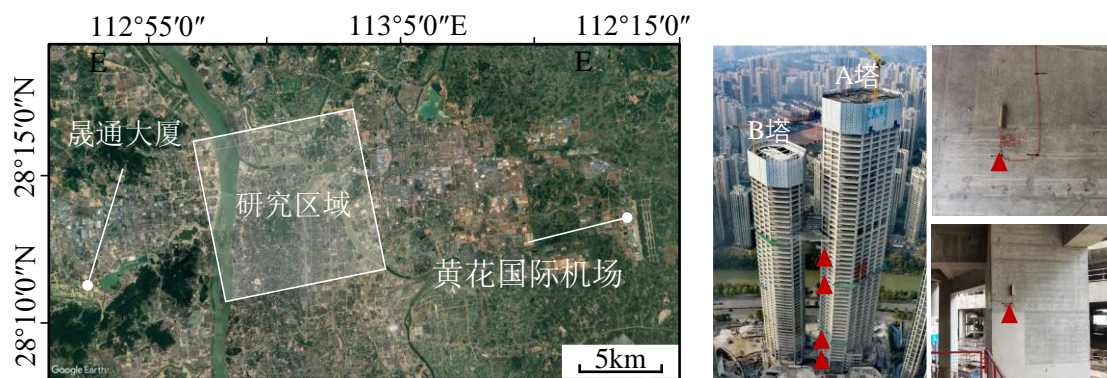


图 5.1 长沙市温度传感器安装位置

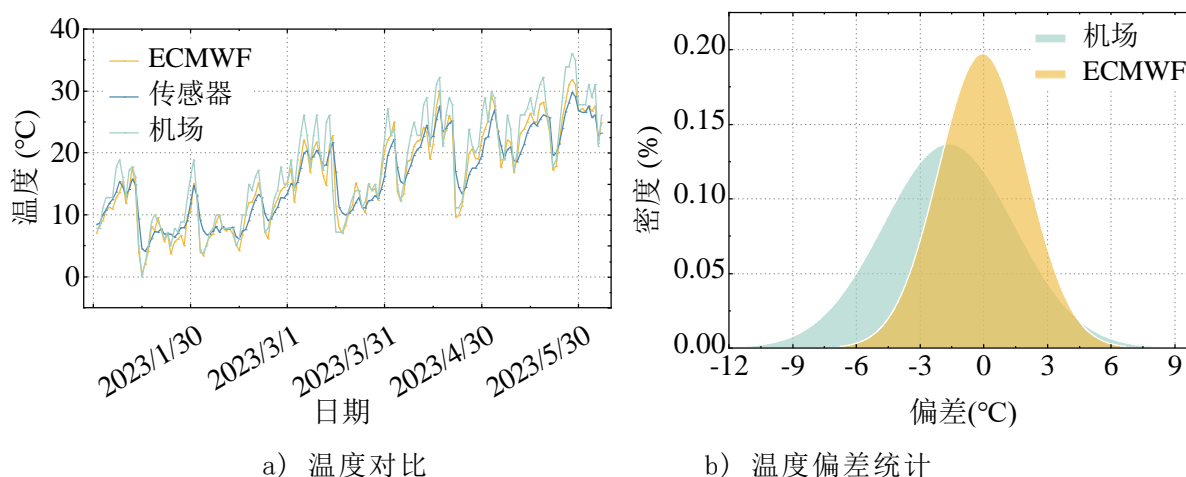


图 5.2 温度数据验证结果

5.2.2 变形结果校验

目前, 由于高层建筑变形获取的难度较大, 少有研究对 PSI 技术获取高层建筑变形结果进行验证, 因此作者在北京昆仑公寓上对 PSI 技术观测高层建筑变形的可靠性进行了验证。作者利用 2014 年 10 月 9 日~2015 年 10 月 4 日期间的 S1 星降轨影像反演北京昆仑大厦历史变形, 并与建筑顶部 GPS 测站记录的变形结果进行校验, 以证明本研究所用 PSI 技术的可靠性。

影像数据及影像拍摄时刻的温度数据见附录 B 表 B.7, 其中 B 为相对主影像的空间基线, t 为相对主影像的时间基线, T 为影像获取时刻的大气温度, 分析影像集的主影像拍摄日期为 2014 年 3 月 2 日。影像获取不连续的主要原因在于 2014 年 S1 卫星处于入轨初期, 存在不连续观测情况。为保证分析的可靠性, 部分空间基线

过大的影像已事先被剔除。昆仑大厦是一座约100米高层建筑，2013年大厦邻近区域进行的深基坑开挖作业对其稳定性构成威胁。为了实时监测建筑的安全状况，Bao等^[171]人在昆仑大厦顶部安装了GPS监测站，获取了2014至2016年期间建筑在东西向、南北向和垂直方向的位移分量。由于S1卫星的下降轨道视角能够避免昆仑大厦西侧施工对干涉影像相干性的影响，并且在建筑顶部识别出了较高置信度的PS点，因此本研究选用了降轨影像集进行分析验证。

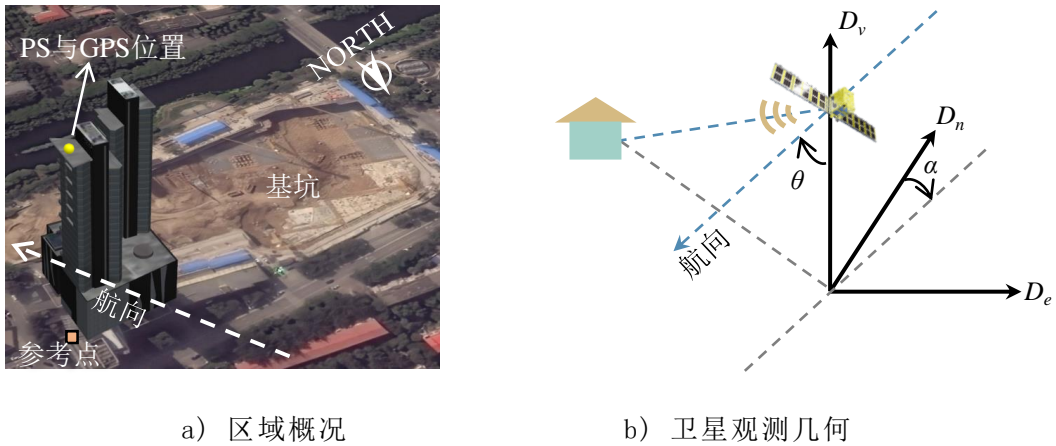


图 5.3 昆仑公寓卫星观测示意图

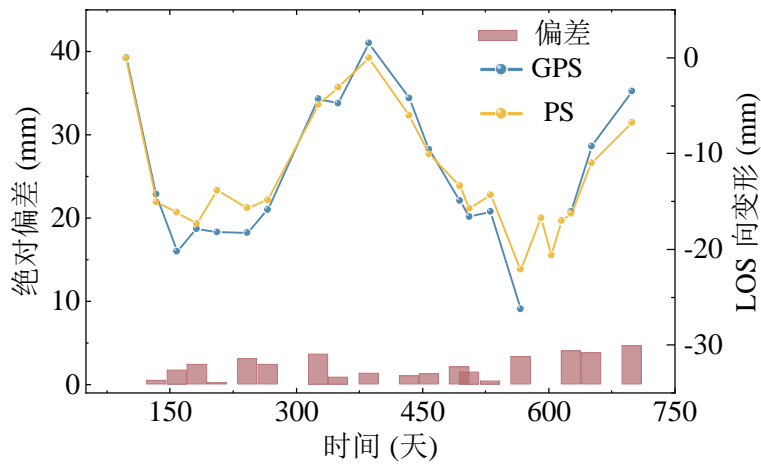


图 5.4 PSI 与 GPS 变形结果对比

如图5.3 (a) 所示，由于该建筑在GPS安装位置存在一个朝向卫星的直角二面角构造，因此构成了一个具有较高置信度的PS点。随后，基于图5.3 (b) 所示的几何关系，采用公式 (2.21)、(2.22) 将GPS观测到的三维变形分量融合成与S1卫星观测视角相对应的LOS变形。最终，如图5.4所示，可以观察到GPS和PSI的观测结果在趋势上高度一致，测得的偏差均在5毫米以内。观测结果的偏差主要来源于以下几个方面：(1) GPS监测站与S1卫星之间的观测频率不一致，GPS采样频率要远高于SAR卫星，对比所用结果为GPS全天变形数据的平均值；(2) PS点位置与GPS安装位置并不完全重合，即变形结果偏差可能来自于建筑不同位置变形的真实差异；(3) 大气等噪声相位的干扰致使PSI变形结果存在一定误差。因此，

综上所述有理由相信，结合S1卫星影像与PSI技术，并引入ECMWF温度数据，能够较准确地获取高层建筑结构变形。

5.3 建筑变形模式识别

5.3.1 研究区域与建筑信息

长沙市作为湖南省省会，常住人口已经突破1000万人，高层建筑密集。然而，城市的快速发展也带来频繁的地下空间开挖、临建建筑施工、水文条件变化等情况，加之部分建筑存在结构老化、不利地质的影响，可能对高层建筑的安全造成威胁。研究区域位于长沙市以 28.22° N纬度和 113.00° E经度为中心的81平方公里范围内。SAR影像为2021年11月到2023年9月期间共53景的S1影像，详细信息如附录B表B.8所示，其中 B 为相对主影像的空间基线， t 为相对主影像的时间基线， T 为影像获取时刻的大气温度。主影像获取于2022年12月6日，所有影像均为升轨模式拍摄。

如图5.5所示，在本研究中选取了一个振幅稳定的像素作为地面控制点(GCP)，并将平均振幅影像基于GCP的经纬度坐标投影到光学卫星地图上。可见，SAR影像图像能够清晰显示出湘江两岸众多高层建筑的轮廓。图5.6展示了基于PSI技术在研究区域内识别出的部分PS点。为对比和验证变形识别结果，并深入研究建筑物变形模式，研究选择了9座建设于不同时期的高层建筑进行分析。建筑物的详细信息见表5.1，建筑立面上检测到的PS点位置见图5.6。

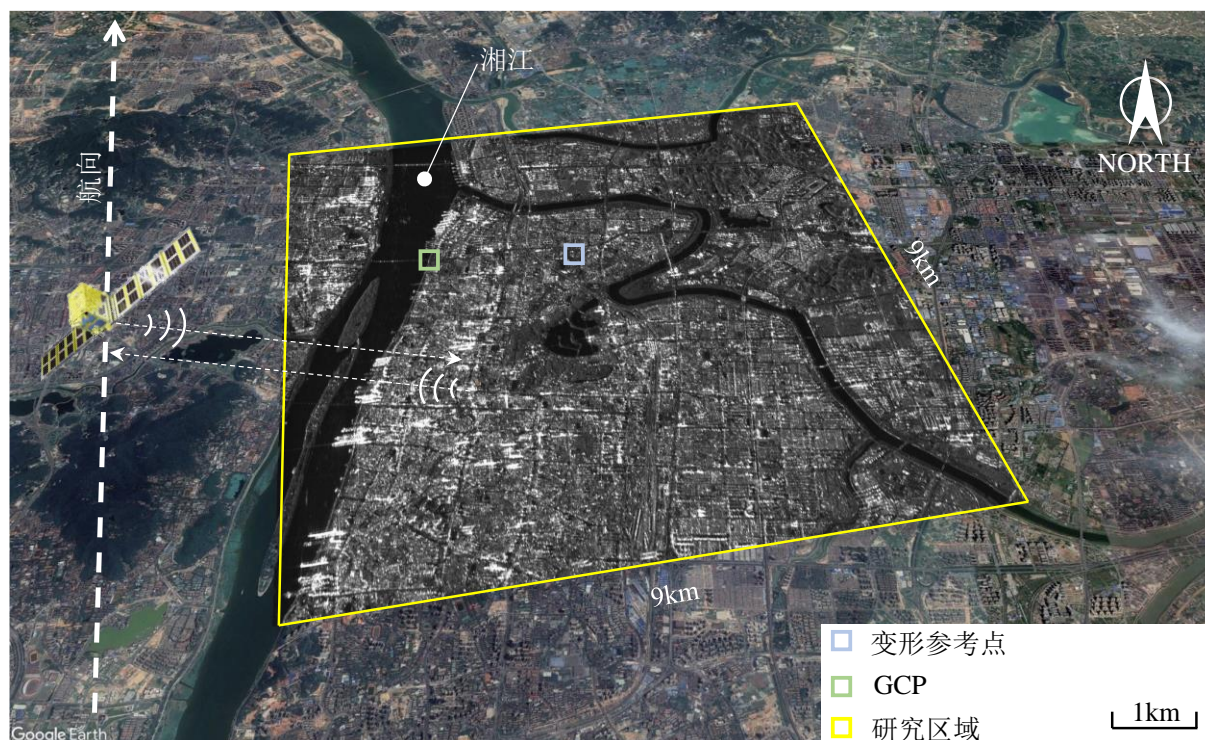


图 5.5 长沙市研究区域平均振幅影像

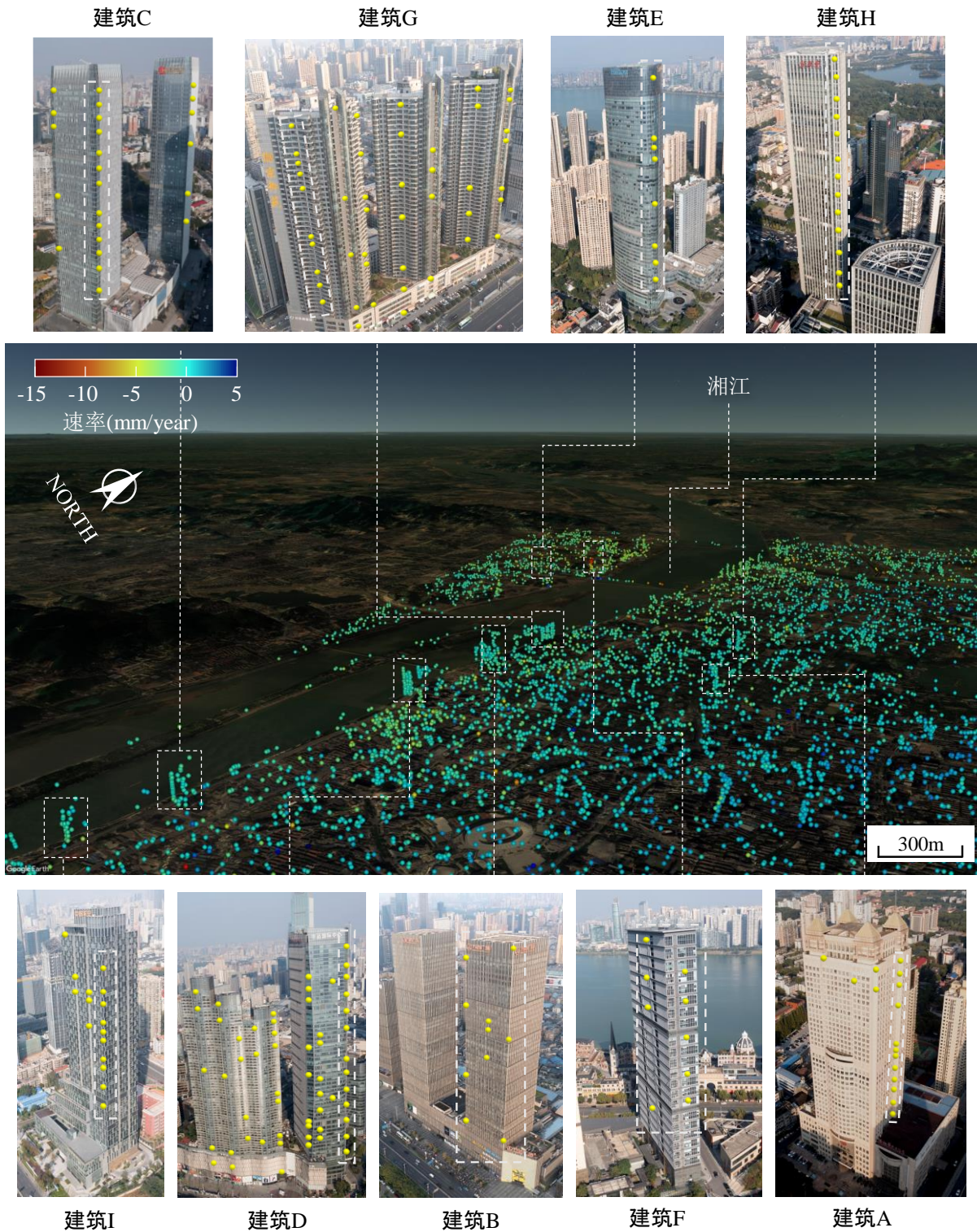


图 5.6 PS 点分布

5.3.2 变形模式 | 建筑

图 5.7、图 5.8、图 5.9 展示了 A、B、C 三栋建筑的变形识别结果。在所有子图(a)中，时间轴的起点均为第一景 SAR 影像的获取时间(2021 年 11 月 5 日)，高度轴对应于同一栋建筑上不同 PS 点的高度值，纵轴则表示这些 PS 点的 LOS

变形。图中，所有 PS 点的 LOS 向变形都呈现出由季节性温度变形特征，变形幅度与它们各自的高度正相关。相较于第 3.3 节展示的理想化分析，可见 PS 点的实际变形曲线更为复杂，这使得通过计算第 3.3 节所述的 A_i 值来确定建筑物的变形模式存在较大困难。同时，这种波浪式、锯齿状的建筑变形特征对异常变形趋势识别带来了巨大干扰。已有一些研究通过剔除建筑温度变形的方式分析建筑异常变形，但过程繁琐且无法同时分析建筑的多点变形。因此，有必要利用公式 (3.5) 计算温度相关变形系数 α_i ，再依据 α_i 的演化趋势识别建筑变形模式。

表 5.1 高层建筑信息

建筑编号	高度 (m)	建成时间	建筑编号	高度(m)	建成时间
A	182	2001	F	150	2021
B	200	2012	G	117	2012
C	230	2018	H	248	2015
D	258	2015	I	211	2020
E	241	2017			

在图 5.7 (b)、图 5.8 (b)、图 5.9 (b) 中，给出了高层建筑温度相关变形系数 α_i 及 α_i 绝对偏差值。可见，这 3 栋建筑的 α_i 绝对偏差值 ($|\Delta\alpha_i|$) 普遍小于 $1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，与第 3.3 节定义的变形模式 I 一致。需要说明的是，在某些相同时刻，这 3 座建筑的 α_i 绝对偏差值中存在一些显著的异常值，这些异常值可能是由大气干扰等原因所致。为避免对后续分析结果的影响，这些异常的 α_i 在后续计算中被事先剔除。由于这 3 座建筑物的 α_i 值稳定，因此建筑温度相关变形可视为仅包含建筑温度变形。在这种情况下， α_i 的概念与钢筋混凝土材料的热膨胀系数类似。通过计算，3 座建筑物的 α_i 均值分别为 $6.66 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、 $6.36 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 和 $9.36 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，这与钢筋混凝土材料的热膨胀系数处于同一数量级。

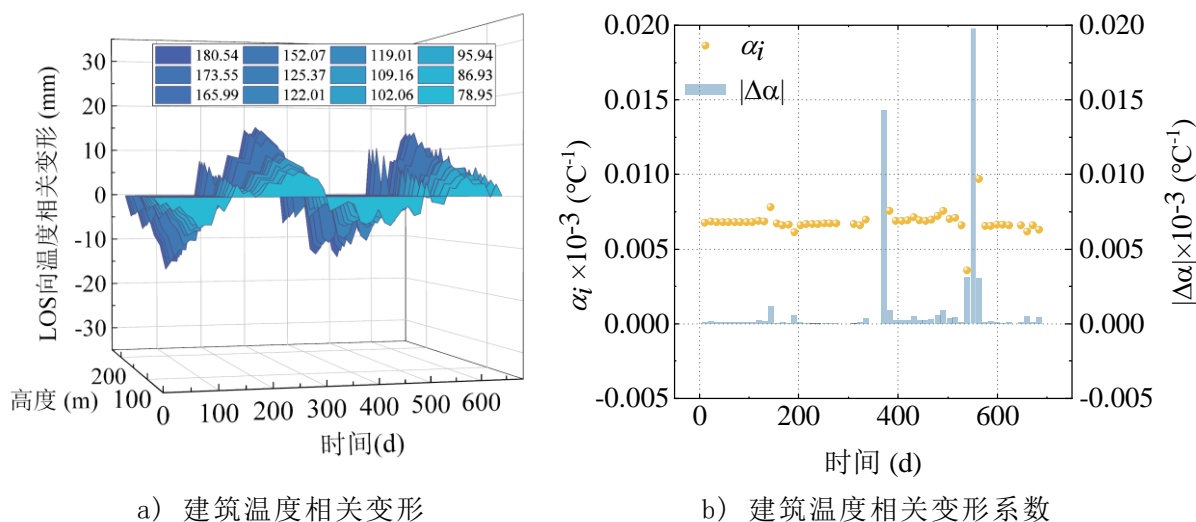


图 5.7 建筑 A 变形识别结果

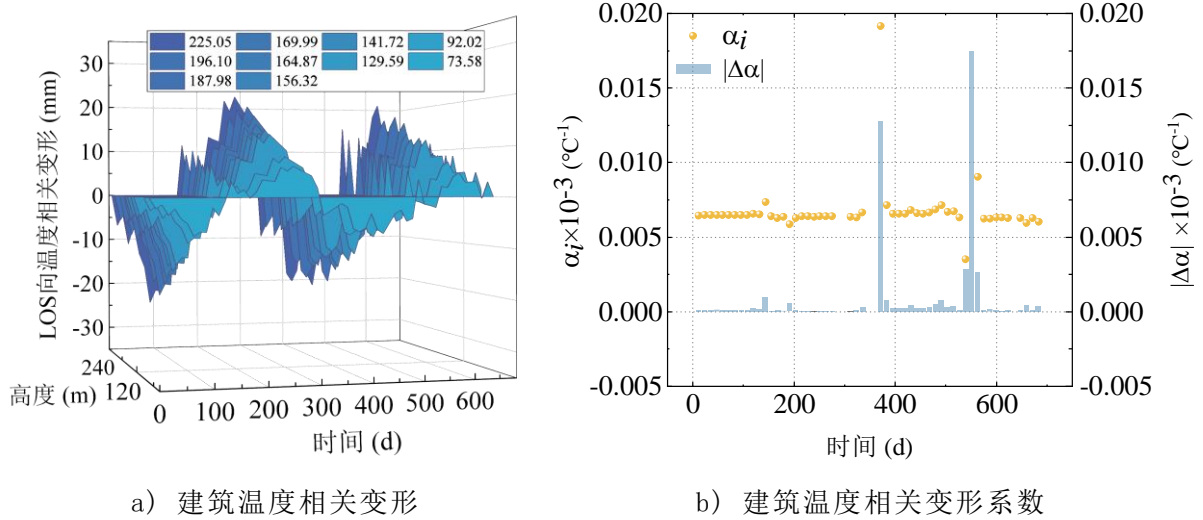


图 5.8 建筑 B 变形识别结果

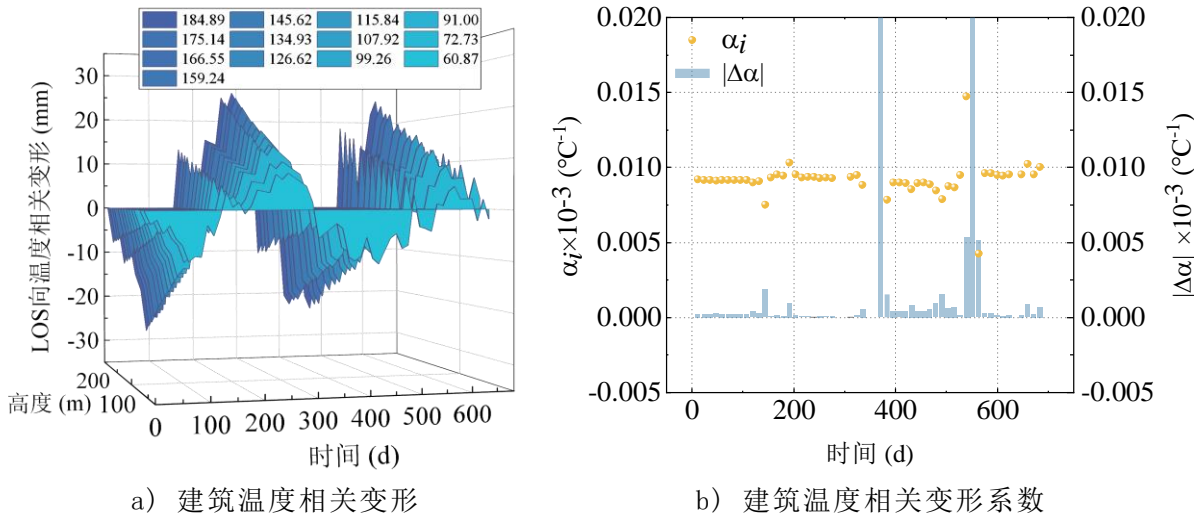


图 5.9 建筑 C 变形识别结果

5.3.3 变形模式 II 建筑

建筑 E、F、G 在系数 α_i 的演变上表现出相似的趋势，因此可归类为同一类建筑变形模式。图 5.10、图 5.11 和图 5.12 展示了这些建筑物的变形识别结果。每个图的子图 (a) 展示了这 3 座高层建筑外立面上 PS 点的温度相关变形结果，同样可见十分明显的季节性温度变形特征。在所有子图 (b) 中， α_i 系数被明显分为 4 个区间，分割点对应于图 (a) 中变形曲线的变形零点。同时可见， α_i 值在降温期内表现为持续增大，在升温期内则持续减小，这对应了第 3.3 节定义的模式 II 高层建筑变形。

对于建筑 D，对 α_i 值进行线性拟合可得变化率 $k=1.19 \times 10^{-9} / ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 。使用公式 (3.9) 可以计算出在 672 天的观测期内（从第二景影像到最后一景影像），建筑物顶部的累计 LOS 变形为 $D_{LOS}^{op} = 0.93\text{mm}$ 。由于该变形的幅度很小，假设其完全归因于建筑高度的减少，即都由收缩或徐变导致，则可以使用公式 (2.20) 计算出结构

顶端的竖向变形约为 1.12mm。可见该变形量值很小，相对其 258m 的建筑高度而言几乎可以忽略。对于建筑 E，通过计算可得到其 α_i 的变化率为 $k=1.36 \times 10^{-9}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。类似的，建筑 E 顶部竖向变形也可以计算得出，约为 1.20mm。更加值得注意的是，建筑 F 表现出十分明显的模式 II 变形特征，其 α_i 变化率为 $k=3.26 \times 10^{-8}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ，为 3 栋建筑中的最大值。在相同的变形监测期间，建筑 F 顶部的 LOS 位移可计算为 $D_{LOS}^{top}=14.89\text{mm}$ ，相当于竖向变形约 17.96mm。其主要原因在于，建筑 F 的竣工时间与监测起始时间非常接近。较大的变形意味着该建筑正在经历更显著的收缩徐变。但从安全性角度看，这一相对较大的变形值，仍处于新建钢筋混凝土结构收缩徐变的合理范围内。

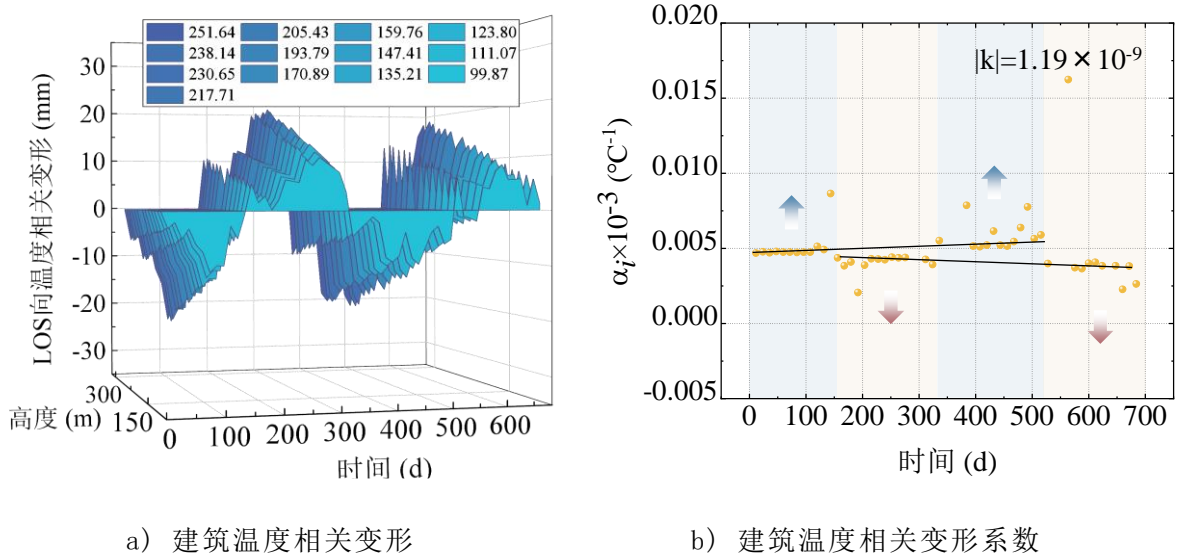


图 5.10 建筑 D 变形识别结果

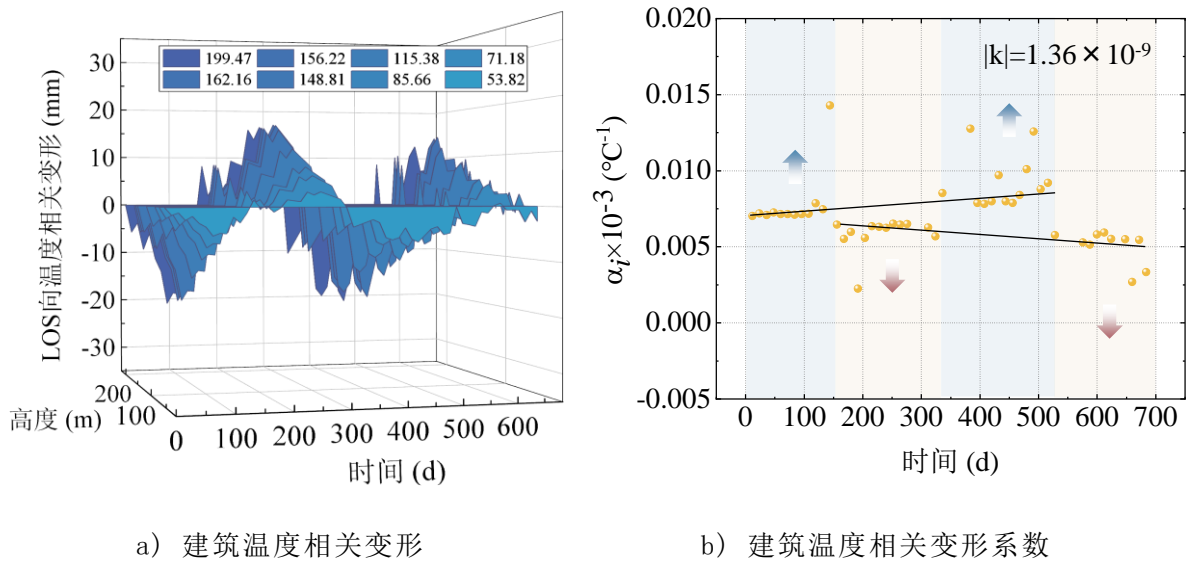


图 5.11 建筑 E 变形识别结果

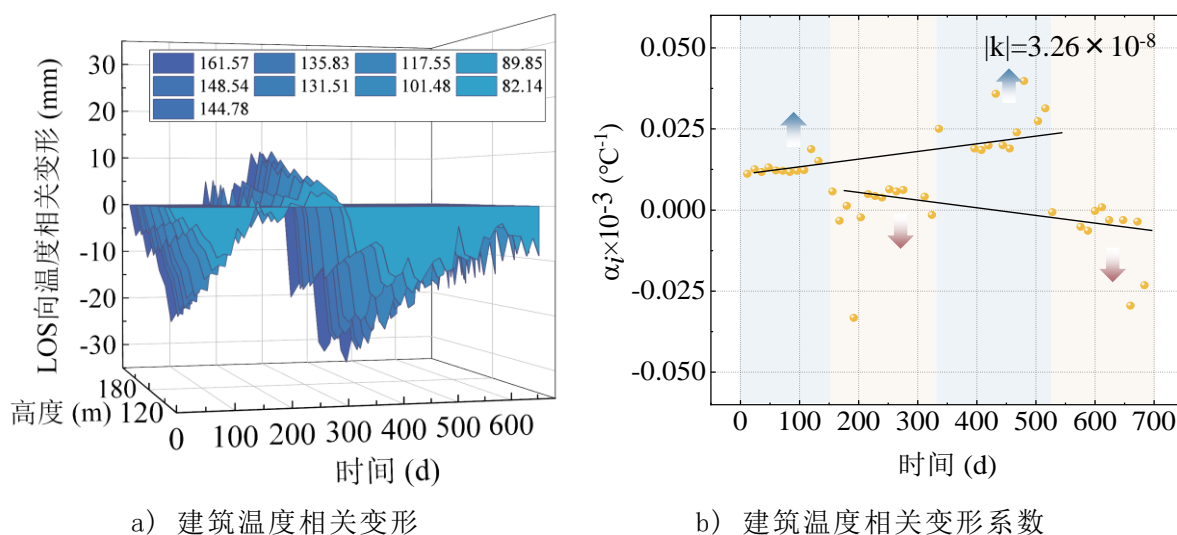


图 5.12 建筑 F 变形识别结果

5.3.4 变形模式 III 建筑

建筑 G、H、I 的变形识别结果分别如图 5.13、图 5.14 和图 5.15 所示。与前述类似，所有子图 (a) 展示了这 3 座建筑外立面上 PS 点的变形结果。从所有子图 (b) 可见，3 栋建筑 α_i 的演化趋势与 5.3.3 节中的 3 栋建筑相反，表明这些建筑可能存在模式 III 变形。对 3 栋建筑的变形进行量化分析可得，建筑 G 的 α_i 变化率为 $k=1.10 \times 10^{-9} / \text{C} \cdot \text{d}$ ，对应其顶端 LOS 向变形为结果为 $D_{LOS}^{op}=0.39\text{mm}$ 。通过几何换算，该建筑顶部靠近卫星的水平向变形约为 0.70mm 。对于建筑 H，可计算得到其 α_i 变化率为 $k=1.14 \times 10^{-9} / \text{C} \cdot \text{d}$ ，对应建筑顶部发生朝向卫星的水平变形约为 1.54mm 。

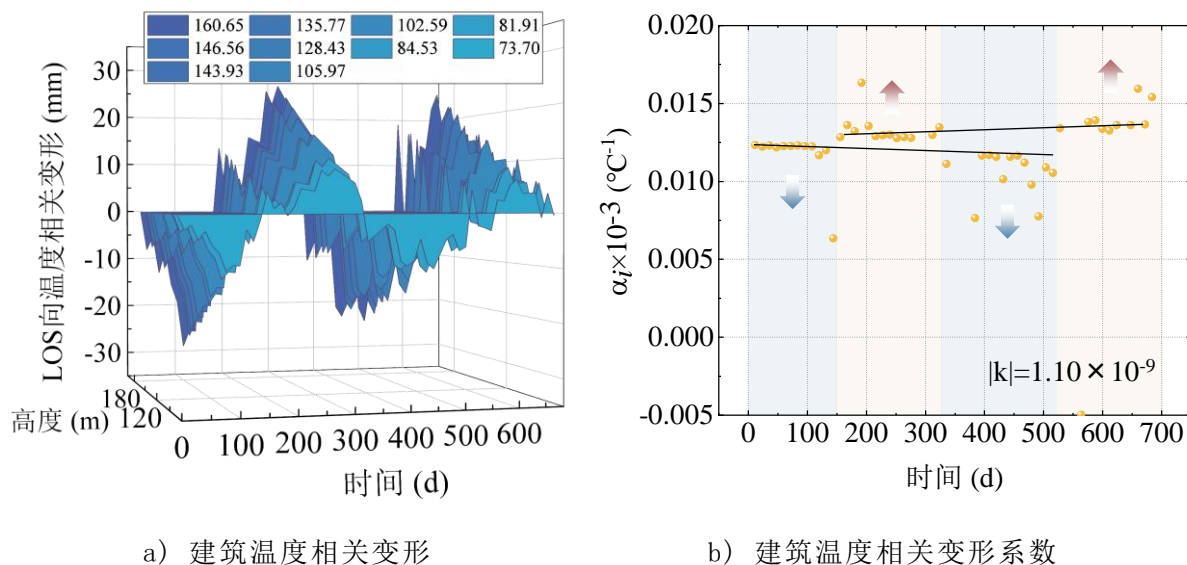


图 5.13 建筑 G 变形识别结果

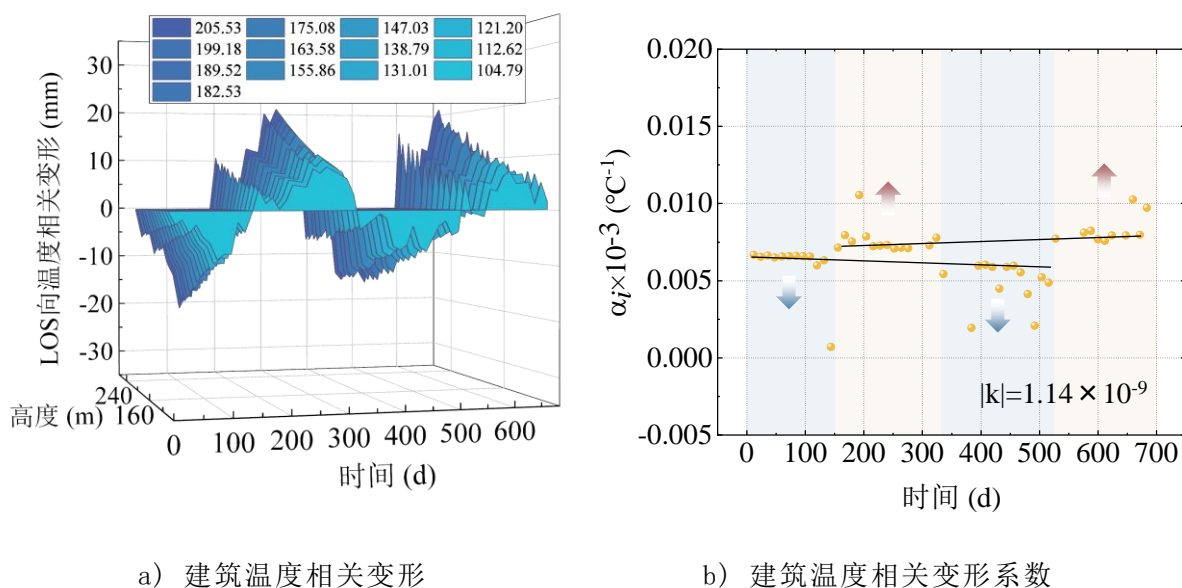


图 5.14 建筑 H 变形识别结果

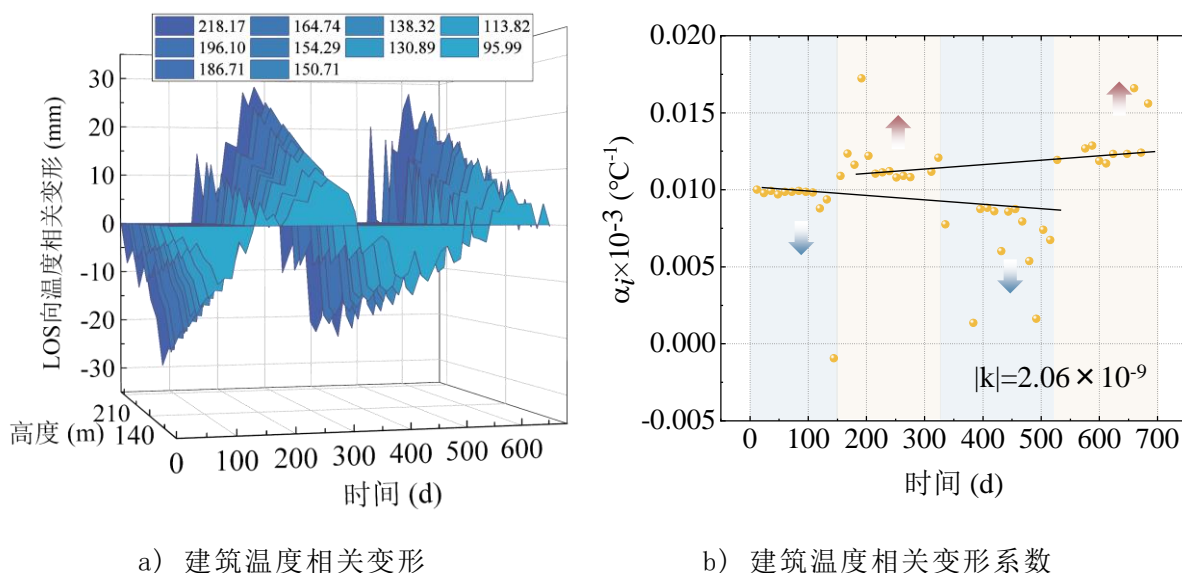


图 5.15 建筑 I 变形识别结果

5.4 建筑变形模式分析

5.4.1 建筑 I 复杂变形分析

值得注意的是，建筑 I 的建设时间与建筑 F 相近，即建成时间与变形监测时间起点相近。可推断，建筑 I 在变形监测期间内将经历较为明显的收缩徐变变形，并呈现出模式 II 的变形特征。然而，如图 5.15 (b) 所示，该建筑 α_i 的演变趋势展现了典型的模式 III 特征。通过计算，可得建筑 α_i 的变化率为 $k=2.06 \times 10^{-9} / ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ ，对应其顶端 LOS 向变形约为 $D_{LOS}^{op}=1.32\text{mm}$ 。为了进一步分析建筑 I 可能存在的异常变形模式，这里首先假设其经历了与建筑 F 相同程度的模式 II 变形。由此，假设建筑纵向变形与高度成正比，则可计算得出建筑 I 顶部可能产生竖向变形为

$17.96\text{mm}/150000\text{mm}\times 211000\text{mm}\times \cos 33.98^\circ=20.95\text{mm}$ 。但建筑并未被观测到这一变形的原因在于，建筑顶部可能产生了靠近卫星向的轻微水平变形。这一靠近卫星的变形掩盖了远离卫星的收缩徐变变形。具体分析示意图见图 5.16，可计算得出建筑 I 顶部由于靠近卫星变形引起的 LOS 变形约为 22.27mm ，对应的水平位移约为 $\Delta x=39.85\text{mm}$ 。考虑建筑 I 较为不规则的建筑外形，这种变形可能来自于建筑轻微的不均匀收缩徐变。

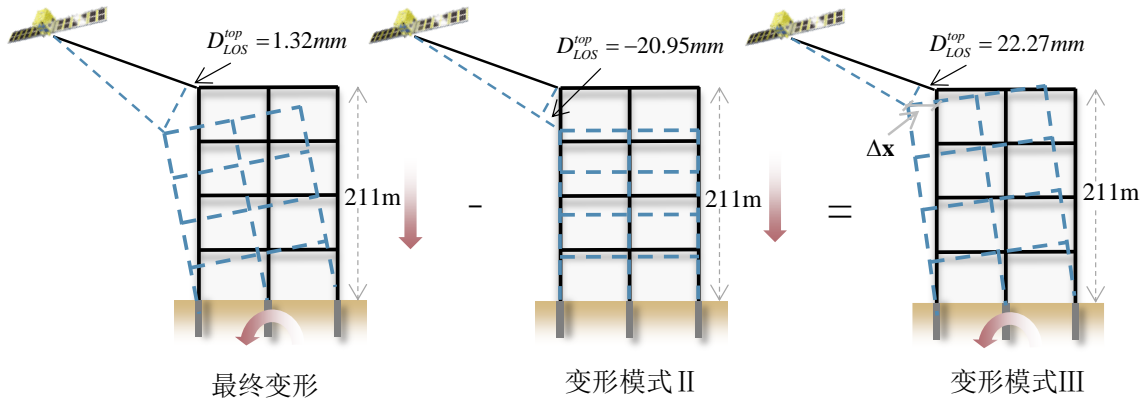


图 5.16 建筑 I 复杂变形模式分析

5.4.2 建筑变形对比分析

表5.2进一步总结了9栋建筑的变形分析结果。关于模式 I 下建筑物的 α 的统计，采用了对应建筑 α_i 的平均值，而对于其他两种模式，则采用了建筑 α_i 的初始值。这一做法的目的在于确保 α 值与材料的热膨胀系数具有最大可比性。在变形量化方面，为确保不同建筑物的变形值具有可比性，表中对所有建筑物顶部变形进行了高度向的归一化，即“变形量化”一栏数值的计算方式为建筑顶端变形除以对应建筑高度后所得的数值。

通过对 α 的统计分析可以观察到，几乎所有值都处于 $6\sim 12\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 区间内，这与钢筋混凝土材料的热膨胀系数相近。建筑 α 值的不同可能与不同的结构形式或建筑材料有关。从建筑变形角度来看，建筑 A 和建筑 B 的温度相关变形系数十分稳定，其主要原因在于两栋建筑使用年限均超过 10 年，其收缩徐变已充分发展，因此 SAR 卫星观测到的温度相关变形仅包含建筑温度变形。2018 年完工的建筑 B 的温度相关变形系数同样保持稳定，其原因可能是经历了类似于建筑 I 的复杂变形模式。此外，观察模式 II 下的 3 栋建筑可见，建筑建成时间越早，其收缩徐变导致的变形量约小，这进一步验证了本研究中所计算变形结果的可靠性。根据《建筑设计规范》(GB50007-2011)^[172]，超过 100 米建筑的顶端水平位移与建筑高度之比不得超过 0.002。3 栋模式 III 下的建筑的该比值分别为 5.98×10^{-6} 、 6.20×10^{-6} 和 1.89×10^{-4} ，均低于 0.002 的阈值，即建筑虽然存在轻微的变形但均处于正常范围。

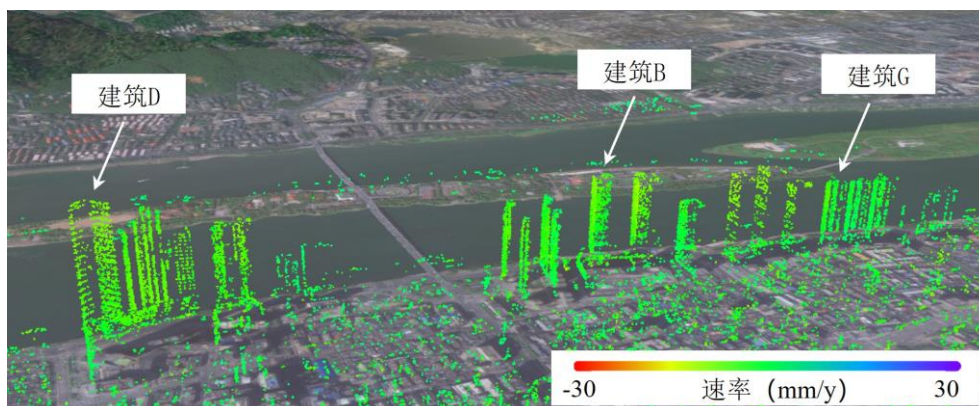
表 5.2 长沙高层建筑变形结果

模式	建筑	$\alpha \times 10^{-6} (\text{°C}^{-1})$	$k \times 10^{-9} (\text{°C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	变形量化
I	A	6.66	-	-
	B	6.36	-	-
	C	9.36	-	-
II	D	4.68	1.19	4.34×10^{-6}
	E	7.02	1.36	4.98×10^{-6}
	F	11.09	32.6	1.20×10^{-4}
III	G	12.33	1.10	5.98×10^{-6}
	H	6.67	1.14	6.21×10^{-6}
	I	10.00	2.06	1.89×10^{-4}

5.5 高分辨率影像监测对比

为进一步验证上述PSI技术对分析高层建筑变形结果的可靠性,同时探索高分辨率SAR卫星影像在高层建筑变形监测中的应用潜力,本文利用3米分辨率的COSMO-SkyMed(CSK)卫星影像对长沙地区上述9栋建筑进行变形观测。影像采集时间为2022年9月27日至2024年5月10日,共计21景,影像详细信息见附录B中表B.9。影像处理软件为香港中文大学和北京东方至远公司联合研发的eSat,采用算法为Tomo-PSInSAR^[46]。在变形估计中同样采用包含温度相位的干涉相位模型,温度数据同样来自ECMWF记录的历史数据。

PS点结果如图5.17所示,CSK影像的分析结果进一步展示了星载InSAR技术在高层建筑变形监测中的巨大应用潜力。由于CSK影像分辨率高于S1影像,同时TomoSAR算法进一步克服了建筑立面上的叠掩效应,因此图5.17中的PS点密度远大于图5.6。在例如建筑D的部分建筑上,PS测点密度甚至足已表征建筑的三维细节,因此星载InSAR技术还有望应用于建筑三维重构,这对未来搭建城市可视化监测平台具有重要意义。



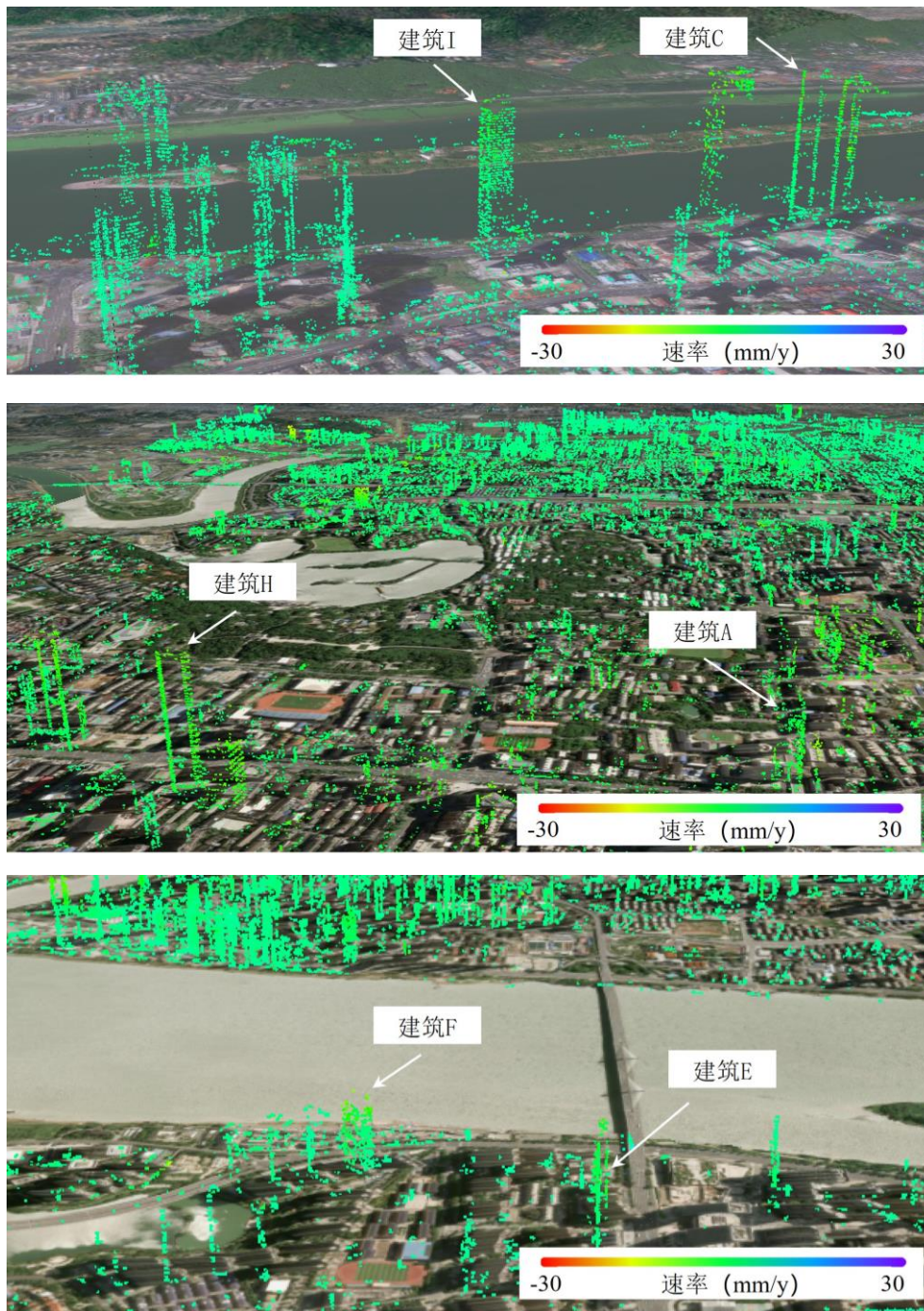
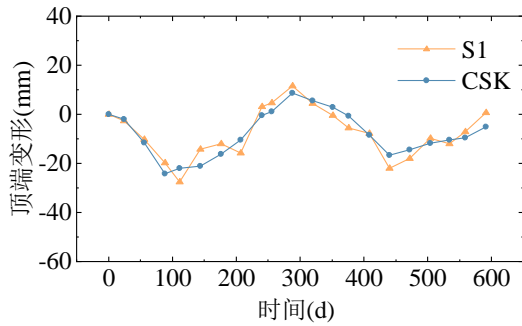


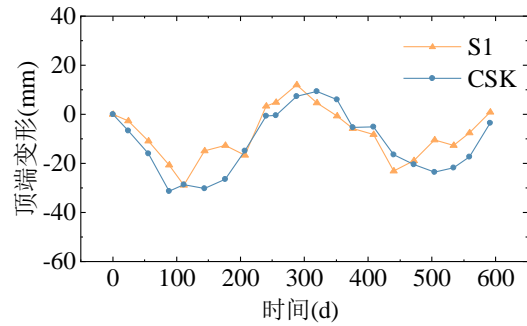
图 5.17 CSK 影像 PS 点结果

本文进一步将 S1 影像与 CSK 影像解析的变形结果进行对比分析，从而进一步验证 S1 影像下 PSI 算法的准确性。如图 5.6 所示，由于 S1 影像下建筑立面测点较为稀疏，因而无法直接获取建筑顶端的变形。为此，本文通过表 5.2 中得到的系数 α 乘以建筑的高度及温差，间接获取 S1 影像下建筑顶端的竖向温度变形，再与图 5.17 中提取到的建筑顶端变形进行对比。9 栋建筑的变形对比结果如图 5.18 所示。从对比结果可见，S1 影像与 CSK 影像计算的建筑顶端变形在趋势和变形幅值上十分一致，这进一步验证了前文分析结果的可靠性。由于各栋建筑的高度、材料、结构形式等不同，因而呈现出了不同的变形特征。例如，建筑 C 的

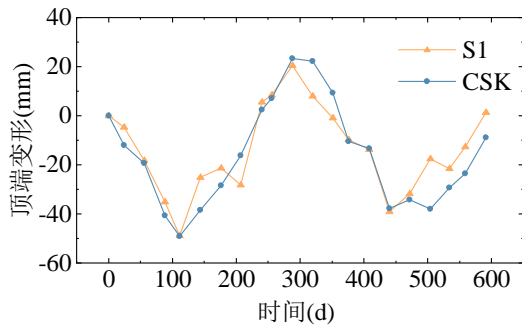
高度为 230 米，建筑 A 的高度为 182 米，二者的变形幅值产生了较大的差异，这主要是因为更高的建筑高度使其顶端累积了更大的温度变形。需要说明的是，由于 S1 影像下的顶端变形结果是通过系数 α 估算的，因此 S1 结果更接近于建筑理论上的温度变形，而 CSK 结果则更接近前文所述的温度相关变形，其中包含温度变形以外的变形分量，这导致两结果在部分时候存在少许偏差。此外，这一偏差还可能来自于算法差别、大气干扰等方面。由于 S1 是理论上的稳定温度变形结果，因此若 CSK 结果与其接近，则表示建筑未持续发生大幅度的不稳定变形。对于建筑 F 和建筑 I，在 2021 年至 2023 年 S1 影像的计算分析中存在一定不稳定变形，利用 2022 年至 2024 年的 CSK 影像可进一步分析其变形发展趋势。通过从图 5.18 (f) 和图 5.18 (i) 可见，S1 结果与 CSK 结果整体上较为一致，这说明二者的不稳定变形是轻微的，且没有进一步发展的趋势。



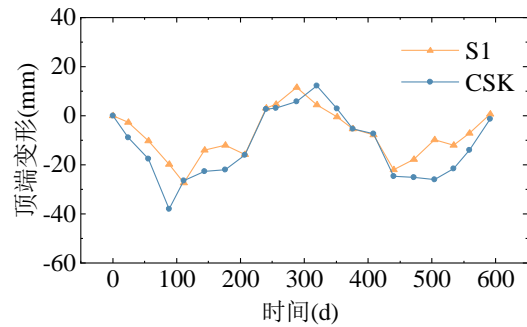
a) 建筑 A



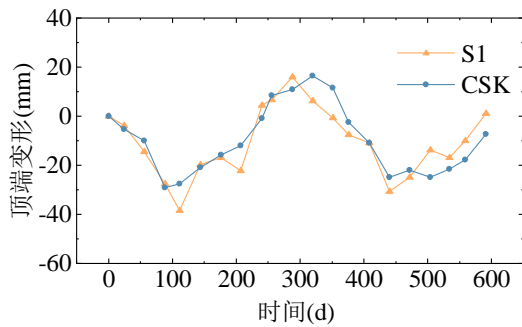
b) 建筑 B



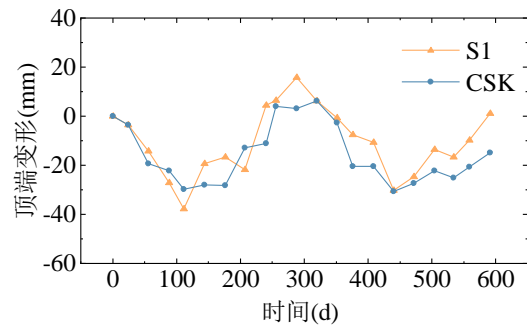
c) 建筑 C



d) 建筑 D



e) 建筑 E



f) 建筑 F

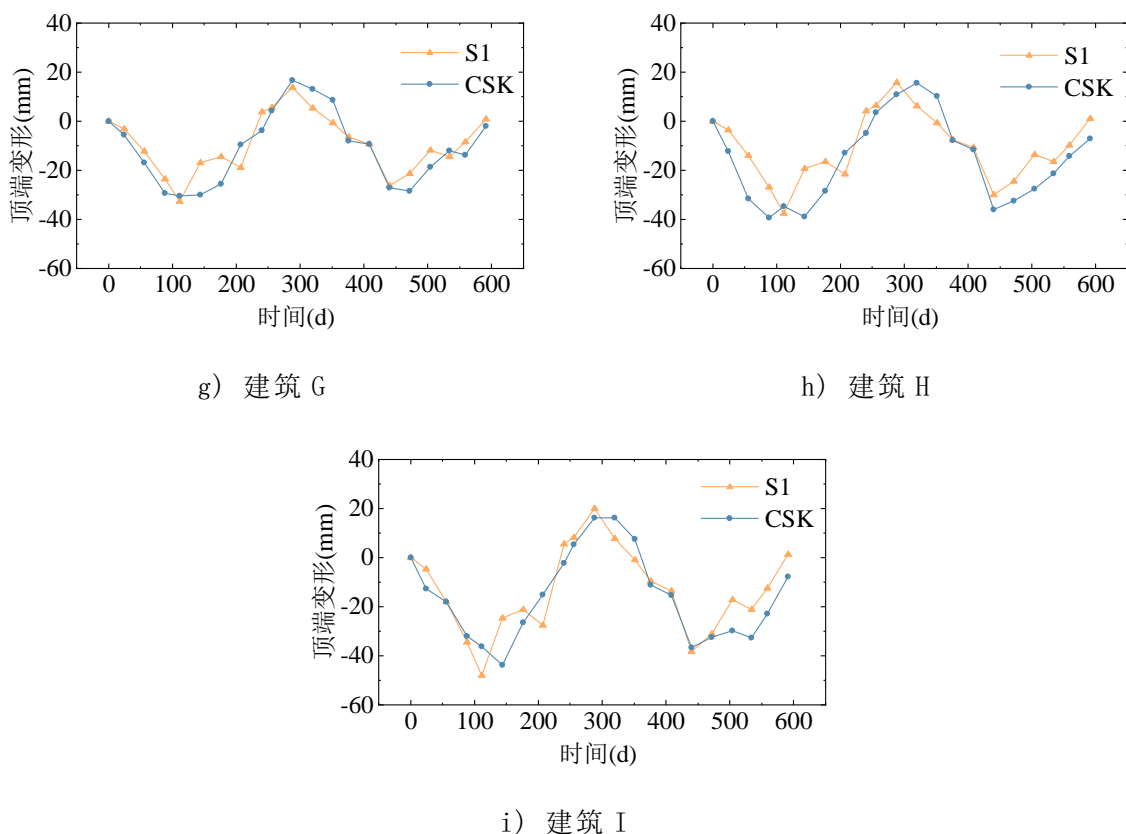


图 5.18 建筑顶端变形对比

5.6 本章小结

本章将第3章所提相关方法,应用于长沙市高层建筑变形监测与异常变形识别。结果证明所提方法有助于克服高层建筑温度变形的干扰,实现利用SAR卫星观测到的建筑LOS向变形结果,直接识别建筑的异常变形。主要结论如下:

(1) 使用高层建筑传感器记录的温度数据验证了ECMWF温度数据。结果表明,ECMWF温度偏差的正态分布期望值接近零,适用于PSI技术中高层建筑变形的解算。此外,通过与北京昆仑大厦的GPS测站所记录变形数据的对比验证,证明S1影像数据与PSI技术结合进行高层建筑变形分析的精度优于5mm。

(2) 利用所提方法,高效识别了长沙市高层建筑的不同变形模式。通过温度相关系数的计算分析,对长沙市9栋代表新高层建筑进行了变形分析。结果表明,所提出的方法能有效克服温度变形在建筑异常变形识别过程中的干扰,并实现高层建筑复杂变形的毫米级别分析。

(3) 长沙市9栋高层建筑的变形分析结果显示,大多数建筑的温度相关变形系数处于 $6\sim 12\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 范围内,与建筑材料热膨胀系数相近。此外,CSK影像的计算结果进一步展现了星载InSAR技术的应用潜力,与S1影像计算结果的对比进一步验证了PSI技术的可靠性。

结论与展望

建筑作为城市空间载体的核心构成要素，其安全性能直接关系到城市社会稳定和城镇化进程的可持续性。然而，在快速城市化背景下，我国建筑正面临老旧存量增多、结构性能退化、地下空间开发、不利地质影响等多重风险挑战，建筑抵风险的韧性显著不足。面向国家关于提高城市安全水平、建设韧性城市、开展“城市体检”等的重大战略需求，本文立足建筑结构异常变形这一建筑安全监测重要指标，将遥感领域的 PSI 技术与建筑结构理论相结合，以期通过低成本、可持续、大范围的变形监测与建筑风险评估提高建筑抵抗风险的韧性。本文系统性综述了现有基于 PSI 技术开展建筑监测与风险评估的研究应用现状，针对建筑监测这一特定场景优化 PSI 技术流程，针对低层浅基础建筑群提出了多尺度变形监测与综合风险评估方法，针对高层建筑群提出了基于温度相关变形系数的异常变形识别方法。具体研究内容和成果如下：

(1) 综述 PSI 技术在建筑监测领域的发展，对其技术流程做了进一步优化。结果表明星载 InSAR 技术具备应用于建筑风险监测的巨大潜力，且已有学者提出系列基于时空分析的建筑风险评估方法，但与建筑结构理论联系的不足，尚且是 PSI 技术应用于工程实际的一大制约。本研究在利用 PSI 技术开展建筑监测时，采用多重阈值筛选建筑 PS 点，引入包含温度相位的干涉相位模型及可靠温度数据反演建筑结构变形，针对复杂建筑环境及结构变形先验信息，提出建筑变形反演参考点优化选取方法。与 GPS 等 GNSS 测站原位记录变形结果的验证表明，优化后的 PSI 技术识别到的变形趋势可靠，且具备优于 5mm 的变形监测精度。

(2) 针对低层浅基础建筑群提出了多尺度变形监测与风险评估方法。将 PSI 技术、建筑结构理论及城市大数据融合，提出“城市-片区-单体”的多尺度变形解析及建筑综合风险评估方法。在中国台北市的应用结果表明，在城市广域尺度上，城市大数据有利于深入解析长时间跨度和大空间跨度的变形场演化原因；在异常变形片区尺度上，基于温度剔除的 IDW 插值法有利于弥补 PSI 技术测点密度不足问题，实现精细化连续变形场构建，结合城市历史实景三维模型、光学卫星影像等，可实现区域异常变形的溯源分析；在单体建筑尺度上，综合考虑建筑整体变形风险与结构损伤风险的综合风险评估方法，有利于克服现有基于 PSI 技术开展建筑风险评估的方法片面性，提高建筑风险评估结果的可靠性。

(3) 针对高层建筑群提出了基于温度相关变形系数的异常变形识别方法。从 SAR 卫星独特观测视角出发，系统归纳高层建筑的典型变形模式，提出温度相关变形系数概念，并分析利用温度相关变形系数演化趋势识别高层建筑异常变形。在长沙市的高层建筑变形监测实例表明，所提方法可有效克服温度变形对高层建

筑异常变形监测的干扰，实现建筑异常变形的高效识别。监测结果同时表明，大多数建筑的温度相关变形系数处于 $6\sim 12\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 范围内，与建筑材料的热膨胀系数相近，这进一步验证了方法的可靠性。通过温度相关变形系数分析可见，建筑时间越早的建筑系数越稳定，这意味建筑除温度变形外的变形都趋于稳定。此外，高分辨率的 CSK 卫星监测结果表明，星载 InSAR 技术还有望开展更为精细化的建筑变形监测与风险评估。

尽管本文对 PSI 技术应用于建筑变形监测与风险评估开展了较为深入的探讨，仍在下列问题上存在进一步研究的需要：

(1) 深入挖掘 SAR 卫星影像信息，进一步提高建筑变形监测可靠度。包括利用 SAR 影像提取建筑信息，实现建筑变化检测；进一步研究密集建筑群电磁波复杂散射特性，以及局部气候、局部地形、局部温度场等对 InSAR 技术反演建筑变形的影响，提高建筑变形监测精度；利用多源 SAR 卫星联合获取建筑三维测点云，实现更为精细化的建筑变形监测；融合 InSAR 分析结果与建筑环境大数据，提出建筑异常变形智能化解析、溯源算法。

(2) 深入研究建筑结构倒塌机理，实现基于 SAR 卫星异常变形观测，高效研判广域建筑群倒塌风险。包括系统梳理国内外现有土木工程领域及遥感领域建筑变形监测规范，区分建筑结构类型提出更为合理的异常变形预警阈值体系；进行结构倒塌试验，研究不同建筑结构形式在不同环境工况下建筑倒塌事故发生的异常变形阈值，进一步明确并完善现有基于星载 InSAR 技术进行建筑风险评估的指标体系；研究不同建筑结构倒塌前的三维变形特征，实现倒塌风险预警。

(3) 探索利用“数据+物理”双驱动的方法，进一步提高建筑风险评估的可靠性。包括利用深度学习等算法，综合已有倒塌建筑实例，充分融合建筑环境致灾因素、InSAR 变形结果等数据，提出以数据为驱动的建筑倒塌风险快速筛查方法；面对 SAR 卫星所获取的有限维度变形结果，充分利用计算机分析仿真、结构倒塌试验等方法，提出以物理为驱动的结构倒塌风险评估方法；融合数据驱动和物理驱动方法，研究实现动态环境变化输入下的城市建筑群动态风险输出。

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. https://www.mohurd.gov.cn/xinwen/gzdt/202405/20240509_777863.html, 2024-5-9
- [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. https://www.gov.cn/zhengce/2020-07/22/content_5528949.htm, 2024-7-22
- [3] 中华人民共和国中央人民政府. 2024 年 1—12 月全国新开工改造城镇老旧小区 5.8 万个. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202502/content_7004853.htm, 2025-2-21
- [4] 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. 工程力学, 2024: 1-9
- [5] 危俊杰. 基于合成孔径雷达干涉测量的大跨桥梁长期变形监测研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2023
- [6] 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. 测绘学报, 2016, 45(6): 713-721
- [7] 刘国祥, 陈强, 罗小军, 等. InSAR 原理与应用. 北京: 科学出版社, 2019
- [8] Wang L, Teng C Q, Jiang K G, et al. D-InSAR monitoring method of mining subsidence based on boltzmann and its application in building mining damage assessment. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(1): 353-370
- [9] 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. 地震研究, 2023, 46(1): 58-73
- [10] Noviello C, Verde S, Zamparelli V. Monitoring buildings at landslide risk with sar: a methodology based on the use of multipass interferometric dat. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2020, 8(1): 91-119
- [11] 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. 工程力学, 2024: 1-4
- [12] Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1989, 94(B7): 9183-9191
- [13] Bamler R, Philipp H. Synthetic aperture radar interferometry. Inverse Problems, 1998, 14(4): R1
- [14] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(3): 333-382

- [15] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2202-2212
- [16] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8-20
- [17] Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, et al. A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(9): 3460-3470
- [18] Zhou W, Chen F L, Guo H D. Differential Radar Interferometry for Structural and Ground Deformation Monitoring: A New Tool for the Conservation and Sustainability of Cultural Heritage Sites. *Sustainability*, 2015, 7(2): 1712-1729
- [19] 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). *Remote Sensing*, 2021, 13(13): 2534
- [20] Barla G, Tamburini A, Del Conte S, et al. InSAR monitoring of tunnel induced ground movements. *Geomechanics and Tunnelling*, 2016, 9(1): 15-22
- [21] 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). *Sensors*, 2020, 20(10): 2749
- [22] Chen F, Lin H, Zhang Y, et al. Ground subsidence geo-hazards induced by rapid urbanization: implications from InSAR observation and geological analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, 12(4): 935-942
- [23] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375-2383
- [24] 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. *Rendiconti Lincei-Scienze Fisiche E Naturali*, 2015, 26: S75-S84
- [25] 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. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(4): 1973-1984
- [26] Goel K, Adam N. Fusion of Monostatic/Bistatic InSAR Stacks for Urban Area Analysis via Distributed Scatterers. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*

- Letters, 2014, 11(4): 733-737
- [27] Hooper A. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(16): L16302
- [28] Balz T, Wei L H, Jendryke M, et al. TomoSAR and PS-InSAR analysis of high-rise buildings in berlin. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Munich, Germany: IEEE Geosci & Remote Sensing Soc, 2012: 447-450
- [29] Pasquali P, Prati C, Rocca F, et al. A 3-D SAR experiment with EMSL data. In: *1995 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'95. Quantitative Remote Sensing for Science and Applications*. Firenze, Italy: IEEE, 1995, 784-786
- [30] Reigber A, Moreira A. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2142-2152
- [31] Lombardini F. Differential tomography: A new framework for SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(1): 37-44
- [32] Fornaro G, Reale D, Serafino F. Four-Dimensional SAR Imaging for Height Estimation and Monitoring of Single and Double Scatterers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(1): 224-237
- [33] Reale D, Fornaro G, Pauciuolo A. Extension of 4-D SAR Imaging to the Monitoring of Thermally Dilating Scatterers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(12): 5296-5306
- [34] 周云, 陈建炜, 邹少豪, 等. 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. *土木工程学报*, 2024: 1-25
- [35] 建筑与桥梁结构监测技术规范: GB5092-2014. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014
- [36] 工程测量标准: GB50026-2020. 北京: 中国计划出版社, 2020
- [37] 工业建筑可靠性鉴定标准: GB 50144-2019. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019
- [38] 建筑基坑工程监测技术标准: GB 50497-2019. 北京: 中国计划出版社, 2019
- [39] 危险房屋鉴定标准: JGJ 125-2016. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016
- [40] 建筑安全星载干涉雷达监测技术规程: T/CECS1165-2022. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022

- [41] InSAR 沉降监测预警规范: T/SZEMA 0002—2023. 深圳: 深圳市应急管理联合会, 2023
- [42] Ma P F, Lin H, Wang W X, et al. Toward Fine Surveillance: A review of multitemporal interferometric synthetic aperture radar for infrastructure health monitoring. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2022, 10(1): 207-230
- [43] Adam N, Eineder M, Yague-Martinez N, et al. High Resolution Interferometric Stacking with TerraSAR-X. In: *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Boston, MA, USA: IEEE, 2008: II-117-II-120
- [44] Crosetto M, Monserrat O, Iglesias R, et al. Persistent Scatterer Interferometry: Potential, Limits and Initial C- and X-band Comparison. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2010, 76(9): 1061-1069
- [45] Perissin D, Wang Z Y, Lin H. Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 73: 58-67
- [46] Ma P F, Lin H. Robust Detection of Single and Double Persistent Scatterers in Urban Built Environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(4): 2124-2139
- [47] Reale D, Fornaro G, Pauciuolo A, et al. Tomographic Imaging and Monitoring of Buildings With Very High Resolution SAR Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(4): 661-665
- [48] Fornaro G, Pauciuolo A, Reale D, et al. Peculiarities of urban area analysis with very high resolution interferometric SAR data. In: *2011 Joint Urban Remote Sensing Event*. Munich, Germany: IEEE, 2011: 185-188
- [49] Zhu X X, Bamler R. Demonstration of Super-Resolution for Tomographic SAR Imaging in Urban Environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(8): 3150-3157
- [50] Wu W Q, Hu J, Du Z G, et al. A Network Optimized Ridge Estimator for Robust PSI Parameter Estimation and Its Application on Deformation Monitoring of Urban Area. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 5436-5452
- [51] Gernhardt S, Cong X, Eineder M, et al. Geometrical Fusion of Multitrack PS Point Clouds. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(1): 38-42
- [52] Wang Y Y, Zhu X X. Automatic Feature-Based Geometric Fusion of Multiview

- TomoSAR Point Clouds in Urban Area. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(3): 953-965
- [53] Ferretti A, Savio G, Barzaghi R, et al. Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(5): 1142-1153
- [54] 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). *Engineering Geology*, 2017, 218: 1-11
- [55] 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. *International Journal of Digital Earth*, 2021, 14(3): 271-287
- [56] Perissin D, Prati C, Rocca F, et al. Multi-track PS analysis in Shanghai, *Proc. ENVISAT 200*, 2007, 23-32
- [57] 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. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2011, 8(3): S1-S12
- [58] Karila K, Karjalainen M, Hyypä J, et al. A Comparison of Precise Leveling and Persistent Scatterer SAR Interferometry for Building Subsidence Rate Measurement. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2013, 2(3): 797-816
- [59] Yang K, Yan L, Huang G M, et al. Monitoring Building Deformation with InSAR: Experiments and Validation. *Sensors*, 2016, 16(12): 2182
- [60] Osmanoglu B, Dixon T H, Wdowinski S, et al. Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(1): 1-12
- [61] Poreh D, Pirasteh S, Cabral-Cano E. Assessing subsidence of Mexico City from InSAR and LandSat ETM plus with CGPS and SVM. *Geoenvironmental Disasters*, 2021, 8(1): 7
- [62] Fabris M, Battaglia M, Chen X, et al. An Integrated InSAR and GNSS Approach to Monitor Land Subsidence in the Po River Delta (Italy). *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5578
- [63] Ng A H-M, Liu Z Y, Du Z Y, et al. A novel framework for combining polarimetric Sentinel-1 InSAR time series in subsidence monitoring-A case study of Sydney. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 295: 113694

- [64] Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-Gonzalez M, et al. Measuring thermal expansion using X-band persistent scatterer interferometry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 100: 84-91
- [65] 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). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 82: 101925
- [66] Li F K, Gong H L, Chen B 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. *Remote Sensing*, 2021, 13(16): 3063
- [67] 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. In: *Conference on SAR Image Analysis, Modeling and Techniques XII*. Edinburgh, Scotland: SPIE, 2012: 67-75
- [68] Bateson L, Novellino A, Hussain E, et al. Urban development induced subsidence in deltaic environments: A case study in Hanoi, Vietnam. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 125
- [69] 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. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(6): 3160-3172
- [70] Bozzano F, Ciampi P, Del Monte M, et al. Satellite A-DInSAR monitoring of the Vittoriano Monument (Rome, Italy): implications for heritage preservation. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 2020, 20(2): 5-17
- [71] Lan H X, Li L P, Liu H J, et al. Complex Urban Infrastructure Deformation Monitoring Using High Resolution PSI. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(2): 643-651
- [72] 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. *Remote Sensing*, 2021, 13(2): 189
- [73] 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. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(6): 707-715
- [74] 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. *测绘科学*, 2021, 46(10): 80-89+117
- [75] 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. *International Journal of Geomate*, 2022, 23(100): 102-109
- [76] Li G E. The self-adaptive observation method of the large-scale building settlement based on InSAR mapping. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(19)
- [77] Parsons T, Wu P-C, Wei M, et al. The Weight of New York City: Possible Contributions to Subsidence From Anthropogenic Sources. *Earths Future*, 2023, 11(5): e2022EF003465
- [78] 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. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(8): 2198-2202
- [79] 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. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21(6): 1046-1056
- [80] 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. *地球信息科学学报*, 2016, 18(11): 1551-1562
- [81] Eineder M, Adam N, Bamler R, et al. Spaceborne Spotlight SAR Interferometry With TerraSAR-X. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(5): 1524-1535
- [82] Ma P F, Zheng Y, Zhang Z J, et al. Building risk monitoring and prediction using integrated multi-temporal InSAR and numerical modeling techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 114: 103076
- [83] Gernhardt S, Bamler R. Deformation monitoring of single buildings using meter-resolution SAR data in PSI. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 73: 68-79
- [84] Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-González M, et al. Analysis of x-band very high resolution persistent scatterer interferometry data over urban areas. In: *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Hannover Workshop*. Hannover, Germany: Int Soc Photogrammetry & Remote Sensing, 2013: 47-51
- [85] Wu W Q, Cui H T, Hu J, et al. Detection and 3D Visualization of Deformations for High-Rise Buildings in Shenzhen, China from High-Resolution TerraSAR-X Datasets. *Applied Sciences-Basel*, 2019, 9(18): 3818
- [86] Ma P F, Lin H, Lan H X, et al. Multi-dimensional SAR tomography for monitoring the deformation of newly built concrete buildings. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015: 118-128
- [87] Budillon A, Schirinzi G. Remote Monitoring of Civil Infrastructure Based on

- TomoSAR. *Infrastructures*, 2022, 7(4): 52
- [88] Zhou, L F, Ma, P F, Xia Y, et al. Monitoring the deformation of high-rise buildings in Shanghai Lujiazui zone by Tomo-PSInSAR. In: ISPRS TC III Mid-term Symposium. Beijing, China: ISPRS, 2018, XLII-3, 2535–2539
- [89] Gernhardt S, Bamler R. Structural deformation and non-seasonal motion of single buildings in urban areas revealed by PSI. In: Joint Urban Remote Sensing Event. Lausanne, Switzerland: Ecole Polytechnique Fed Lausanne, 2015: 1-4
- [90] 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. *Applied Geography*, 2016, 77: 20-37
- [91] Hussain M A, Chen Z L, Zheng Y, et al. PS-InSAR Based Monitoring of Land Subsidence by Groundwater Extraction for Lahore Metropolitan City, Pakistan. *Remote Sensing*, 2022, 14(16): 3950
- [92] Gumilar I, Sidiq T P P, Virtriana R, et al. Geodetic observations confirming land subsidence of Bandung Basin, Indonesia, and subsequent building damage. *ACTA Geodaetica Et Geophysica*, 2023, 58(3): 373-388
- [93] Giardina G, Milillo P, Dejong M J, et al. Evaluation of InSAR monitoring data for post-tunnelling settlement damage assessment. *Structural Control & Health Monitoring*, 2019, 26(2): e2285
- [94] Yang M S, Wang R, Li M H, et al. A PSI targets characterization approach to interpreting surface displacement signals: A case study of the Shanghai metro tunnels. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 280: 113150
- [95] Perissin D, Wang Z Y, Lin H. Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 73: 58-67
- [96] Wang L, Teng C Q, Jiang K G, et al. D-InSAR Monitoring Method of Mining Subsidence Based on Boltzmann and Its Application in Building Mining Damage Assessment. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2022, 26(1): 353-370
- [97] Du Y N, Feng D C, Wu G. InSAR-based rapid damage assessment of urban building portfolios following the 2023 Turkey earthquake. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2024, 103: 104317
- [98] Li Q, Wang W, Wang J F, et al. Exploring the relationship between InSAR coseismic deformation and earthquake-damaged buildings. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 262: 112508

- [99] 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). *Remote Sensing*, 2023, 15(6): 1587
- [100] 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. *Giscience & Remote Sensing*, 2024, 61(1): 2293522
- [101] Ciampalini A, Bardi F, Bianchini S, et al. Analysis of building deformation in landslide area using multisensor PSInSARTM technique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 33: 166-180
- [102] Bardi F, Frodella W, Ciampalini A, et al. Integration between ground based and satellite SAR data in landslide mapping: The San Fratello case study. *Geomorphology*, 2014, 223: 45-60
- [103] 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. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 235: 111464
- [104] 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). *Engineering Geology*, 2006, 88(3-4): 240-259
- [105] Lin S Y. Urban hazards caused by ground deformation and building subsidence over fossil lake beds: a study from Taipei City. *Geomatics Natural Hazards & Risk*, 2022, 13(1): 2890-2910
- [106] Zhang H X, Zeng R G, 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. *Engineering Geology*, 2022, 297: 106482
- [107] Han L, Cao L H, Wu Q F, et al. Identification of Surface Deformation-Sensitive Features under Extreme Rainfall Conditions in Zhengzhou City Based on Multi-Source Remote Sensing Data. *Applied Sciences-Basel*, 2023, 13(24): 13063
- [108] 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. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 235: 111453
- [109] 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). *Landslides*, 2017, 14(2): 743-754

- [110] 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. 测绘通报, 2016,(6): 18-21+86
- [111] Zhu M, Wan X L, Fei B G, et al. Detection of Building and Infrastructure Instabilities by Automatic Spatiotemporal Analysis of Satellite SAR Interferometry Measurements. *Remote Sensing*, 2018, 10(11): 1816
- [112] Gao H, Xiong L Y, Chen J H, et al. Surface Subsidence of Nanchang, China 2015-2021 Retrieved via Multi-Temporal InSAR Based on Long- and Short-Time Baseline Net. *Remote Sensing*, 2023, 15(13): 3253
- [113] Sheng H Q, Zhou L, Huang C J, et al. Surface Subsidence Characteristics and Causes in Beijing (China) before and after COVID-19 by Sentinel-1A TS-InSAR. *Remote Sensing*, 2023, 15(5): 1199
- [114] Chen F L, Guo H D, Ma P F, et al. Radar interferometry offers new insights into threats to the Angkor site. *Science Advances*, 2017, 3(3): e1601284
- [115] Chen F L, Zhou W, Chen C F, et al. Extended D-TomoSAR Displacement Monitoring for Nanjing (China) City Built Structure Using High-Resolution TerraSAR/TanDEM-X and Cosmo SkyMed SAR Data. *Remote Sensing*, 2019, 11(22): 2623
- [116] Frattini P, Crosta G B, Allievi J. Damage to Buildings in Large Slope Rock Instabilities Monitored with the PSInSAR™ Technique. *Remote Sensing*, 2013, 5(10): 4753-4773
- [117] 朱茂, 葛春青, 班勇, 等. 基于 InSAR 的城市建筑安全监测技术研究. 工业建筑, 2024, 54(2): 51-57
- [118] Xu Y M, Wu Z, Zhang H W, 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. *Remote Sensing*, 2023, 15(11): 2851
- [119] Ferretti A, Ferrucci F, Prati C, et al. SAR analysis of building collapse by means of the permanent scatterers technique. In: 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
- [120] 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. *Remote Sensing*, 2023, 15(15): 3867
- [121] 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. 自然灾害学报, 2022, 31(3): 175-183
- [122] 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. 地球科学, 2023, 48(5): 1807-1824
- [123] Ma C, Lu B L. Prediction of the Deformation of Heritage Building Communities under the Integration of Attention Mechanisms and SBAS Technology. *Electronics*, 2023, 12(23): 4724
- [124] 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. 测绘通报, 2024(4): 48-53
- [125] 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. In: 3rd Conference on Geotechnical Frontiers. Orlando, FL: Ind Fabr Assoc Int, 2017: 509-519
- [126] 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. *Remote Sensing*, 2020, 12(20): 3307
- [127] 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. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 282
- [128] 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. *Natural Hazards*, 2022, 114(3): 2479-2508
- [129] 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). *Remote Sensing*, 2023, 15(5)
- [130] 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. *Journal of Building Engineering*, 2023, 73
- [131] 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. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2021, 56
- [132] 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. *Remote Sensing*, 2015, 7(4): 4678-4701
- [133] Liu Y Z, Cao W X, Shi Z Q, et al. Evaluation of Post-Tunneling Aging Buildings Using the InSAR Nonuniform Settlement Index. *Remote Sensing*, 2023, 15(14): 3467
- [134] 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. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2014, 10(11): 1469-1483
- [135] Cerchiello V, Tessari G, Velterop E, et al. Building Damage Risk by Modeling Interferometric Time Series. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(4): 509-513
- [136] Macchiarulo V, Milillo P, Dejong M J, et al. Integrated InSAR monitoring and structural assessment of tunnelling-induced building deformations. *Structural Control & Health Monitoring*, 2021, 28(9)
- [137] 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. In: *Conference on SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XV*. Toulouse, France: SPIE, 2015:108-116
- [138] Lipecki T. Non-Contact Diagnostics of the Geometry of a Historic Wooden Building as an Element of Periodic Safety Assessment. *Sensors*, 2022, 22(4)
- [139] 秦晓琼. 时间序列 D-InSAR 城市基础设施精细形变测量研究: [武汉大学博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2019: 15-17
- [140] Ghiglia D C, Pritt M D, *Two-dimensional Phase Unwrapping Theory, Algorithms, and Software*. New York: John Wiley and Sons Ltd, 1998
- [141] 廖明生, 林琿. 雷达干涉测量—原理与信号处理基础. 北京: 测绘出版社, 2003
- [142] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite Radar Interferometry Two-dimensional Phase Unwrapping. *Radio Science*, 1988, 23(4): 713-720
- [143] Loffeld O, Nies H, Knedlik S, et al. Phase Unwrapping for SAR Interferometry: A Data Fusion Approach by Kalman Filtering. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 47-58
- [144] Pu L M, Zhang X L, Zhou Z N, et al. A Robust InSAR Phase Unwrapping Method via Phase Gradient Estimation Network. *Remote Sensing*. 2021, 13(22): 4564
- [145] 李德仁, 廖明生, 王艳. 永久散射体雷达干涉测量技术. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2004, (8): 664-668
- [146] 陶秋香, 刘国林. PS InSAR 公共主影像优化选取的一种新方法. *武汉大学学*

- 报(信息科学版), 2011, 36 (12): 1456-1460
- [147] 廖明生, 王腾. 时间序列 InSAR 技术与应用. 北京: 科学出版社, 2014
- [148] Lin Q, Vesecky J F, Zebker H A. New approaches in interferometric SAR data-processing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(3): 560-567
- [149] 李鹏, 李振洪, 施闯, 等. 中国地区 30 m 分辨率 SRTM 质量评估. *测绘通报*, 2016(9): 24-28
- [150] 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. *遥感学报*, 2021, 25(10): 2083-2094
- [151] 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. *西南交通大学学报*, 2007, 42(4): 414-428
- [152] Costantini M, Falco S, Malvarosa F, et al. Persistent Scatterer Pair Interferometry: Approach and Application to COSMO-SkyMed SAR Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(7): 2869-2879
- [153] Monserrat O, Crosetto M, Cuevas M, et al. The Thermal Expansion Component of Persistent Scatterer Interferometry Observations. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(5): 864-868
- [154] 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. *Structural Control & Health Monitoring*, 2024, 2024: 2326106
- [155] 周云, 陈建炜, 郝官旺, 等. 融合 InSAR 技术与大数据的城市建筑群结构变形风险评估——以台北市为例. *土木工程学报*, 2024: 1-16
- [156] Yun Zhou, Guanwang Hao, Jianwei Chen, Junjie Wei, Jiayuan Zheng. Long-term deformation monitoring of a steel-truss arch bridge using PSI technique refined by temperature field analysis. *Engineering Structures*, 2024, 311: 118164.
- [157] 郑佳缘. 基于气象大数据的大跨桥梁温度效应预测方法研究: [湖南大学硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学土木工程学院: 2023
- [158] 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. *Remote Sensing*, 2015, 7(4): 4678-4701
- [159] Burland J B, Wroth C P. Settlement of buildings and associated damage. In: *Conference on Settlement of Structures*. 1975
- [160] Finno R J, Voss F T, Rossow E, et al. Evaluating damage potential in buildings

- affected by excavations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(10): 1199-1210
- [161] 王卫东, 徐中华. 预估深基坑开挖对周边建筑物影响的简化分析方法. *岩土工程学报*, 2010, 32(增刊 1): 32-38
- [162] Ng A H M, Ge L L, Li X J. Land deformation mapping with ALOS PALSAR data: a case study of Taipei City. In: 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Beijing, 2016, 6051–6054
- [163] Tung H, Chen H Y, Hu J C, et al. Transient deformation induced by groundwater change in Taipei metropolitan area revealed by high resolution X-band SAR interferometry. *Tectonophysics*, 2016, 692: 265-277
- [164] Lin S H, Hu J C. Analysis of groundwater-induced deformation and hydraulic parameter in Taipei basin by InSAR measurement and numerical Model. In: 20th EGU General Assembly. 2018: 14077
- [165] Lin S Y. Urban hazards caused by ground deformation and building subsidence over fossil lake beds: a study from Taipei City. *Geomatics Natural Hazards & Risk*, 2022, 13(1): 2890-2910
- [166] 殷滋. 台北路面现巨坑住户紧急撤离. <https://www.163.com/dy/article/I4MLJAFG0514EGPO.html>. 2023-5-14
- [167] 赵浩雲. 大直民宅二度塌陷. <https://news.ebc.net.tw/news/society/381357>. 2023-9-8
- [168] 于川. 信义线东延段建筑下陷. <https://www.chinatimes.com/cn/realtimenews/20231013003499-260407?chdtv>. 2023-10-13
- [169] 任羿馨. 松山家商疑因捷运施工 1 年下陷 5 公分. <https://nextapple.sg/politics/20231210/7EFD0A74CCA6DB5C9287F7FDE0DE3BD2>. 2023-12-10
- [170] Zhou Y, Luo X M, Ye P, et al. Bayesian-based prediction and real-time updating of axial deformation in high-rise buildings during construction. *Engineering Structures*, 2023, 297: 116992
- [171] Bao Y, Guo W, Wang G Q, et al. Millimeter-accuracy structural deformation monitoring using stand-alone GPS: case study in Beijing, China. *Journal of Surveying Engineering*, 2018, 144(1): 05017007
- [172] 建筑地基基础设计规范: GB5007-2011. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011

致 谢

周门三载，一言以蔽之，曰：“学无止，思无涯，恩似海。”

实事求是，经世致用，探索学识边界，谓之“学无止”。麓山巍巍，湘水泱泱。湖南大学的三年，是受千年书院历史文化熏陶的三年，是受百年名校大师文化激励的三年。幸得湖南大学提供的优渥学习环境，得以提升专业素养，领略学科前沿，体会学海无涯，自当步履不辍。

敢为人先，学科交叉，激发思维碰撞，谓之“思无涯”。惟楚有材，于斯为盛。湖南大学的三年，有幸成为“湖南大学天空地一体化结构健康监测与运维中心”的一员，深究专业学识、外出交流学习、畅想技术未来。幸能读万卷书，行万里路，期间启迪无数，自觉终身受益。

尊师教诲，亲友相助，终获硕士学位，谓之“恩似海”。师道既尊，学风自善。湖南大学的三年，最大的幸运要属遇到一位广受师生好评的导师——周云教授。其专业扎实、学识广博、思维敏捷、勤勉尽责、指导得力、亦师亦友、亲切幽默、关心学生，是学术上的导师，亦是生活上的向导。感谢恩师在研究中给予的大力指导，在论文写作上给予的悉心修改，在能力历练中给予的宝贵机会，在生活中给予的诸多关心，以及在犯错中给予的包容，点点滴滴，终生不忘。同时，感谢师爷易伟建教授在研究方向选择、研究方法改进、论文审阅修改等方面的付出。感谢校外导师谈忠坤董事长及中腾智信公司在科研上提供的大力协助。感谢学院党委、团委、辅导员等老师在学习、工作、生活中给予的关爱。感谢郝官旺博士、危俊杰师兄在科研中给予的耐心解答与指导，感谢罗先明博士、周晓枫博士、朱师琪博士、肖寒博士的多方协助，感谢汪柏煊、冷建波、徐晓婉、李婷、邹少豪、刘迎澳、魏子青、杨晨焱、陈祎林、张阳、刘森森、曹爽、雷霆、徐骢荣、刘程等同门在各项工作中的团结协作。特别感谢室友蔡梓涵、胡世君、束斌三年来的互帮、互助、互促与支持。借此，也感谢所有家人多年来对我的理解、支持、鼓励与帮助，求学多年，少有陪伴，养育之恩，无以为报，但愿无负所望。

行文至此，毕业将至，湖大三载，受益良多。怀念课题组的每一次组会、研讨、试验、出差、聚餐、出游。祝恩师身体健康、生活美满、桃李满天、工作顺利、学术长青！愿课题组成果涌现、蒸蒸日上、勇夺一流！

万般不舍，终有别离。湖大，再见！

陈建炜

2025年5月于岳麓山下

附录A 攻读学位期间所发表的学术论文

- [1] 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. *Structural Control and Health Monitoring*, 2024, 2024: 2326106
- [2] Zhou Y, Hao G W, **Chen J W**, et al. Long-term deformation monitoring of a steel-truss arch bridge using PSI technique refined by temperature field analysis. *Engineering Structures*, 2024, 311: 118164
- [3] 周云, **陈建炜**, 邹少豪, 等. 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. *土木工程学报*, 2024: 1-25
- [4] 周云, **陈建炜**, 郝官旺, 等. 融合 InSAR 技术与大数据的城市建筑群结构变形风险评估——以台北市为例. *土木工程学报*, 2024: 1-16
- [5] 周云, 陈伟林, **陈建炜**, 等. 一种基于 InSAR 位移测量的多颗 SAR 卫星角反射器跟踪控制方法、跟踪控制系统以及跟踪式角反射器. 发明专利. CN 119472454 B, 2025-04-25

附录B SAR卫星影像信息

表 B.1 影像集 SET-A1 信息

No.	影像日期	B (m)	t (d)	T (°C)	No.	影像日期	B (m)	t (d)	T (°C)
1	20190105	-81.93	-168	20	17	20190704	-26.36	12	32
2	20190117	-13.42	-156	16	18	20190716	1.98	24	32
3	20190129	20.44	-144	20	19	20190728	41.61	36	31
4	20190210	-11.77	-132	17	20	20190809	116.15	48	28
5	20190222	12.60	-120	16	21	20190821	87.48	60	27
6	20190306	41.17	-108	16	22	20190902	5.08	72	31
7	20190318	-37.23	-96	22	23	20190926	66.00	96	26
8	20190330	58.99	-84	21	24	20191008	40.59	108	27
9	20190411	10.38	-72	20	25	20191020	15.15	120	24
10	20190423	116.85	-60	30	26	20191101	31.16	132	24
11	20190505	3.04	-48	25	27	20191113	9.35	144	23
12	20190517	4.79	-36	28	28	20191125	-48.79	156	20
13	20190529	-10.14	-24	23	29	20191207	-31.76	168	16
14	20190610	-32.09	-12	26	30	20191219	7.61	180	19
15	20190622	0.00	0	29	31	20191231	8.02	192	14
16	20190105	-81.93	-168	20					

表 B.2 影像集 SET-A2 信息

No.	影像日期	B (m)	t (d)	T (°C)	No.	影像日期	B (m)	t (d)	T (°C)
1	20191231	2.07	-180	14	17	20200710	-32.37	12	33
2	20200112	-16.63	-168	14	18	20200722	2.50	24	34
3	20200124	-22.52	-156	23	19	20200803	-1.35	36	26
4	20200205	-31.69	-144	16	20	20200815	54.51	48	30
5	20200217	-0.55	-132	11	21	20200827	118.37	60	26
6	20200229	-13.73	-120	23	22	20200908	71.29	72	31
7	20200312	40.53	-108	22	23	20200920	11.43	84	26
8	20200324	11.96	-96	21	24	20201002	-24.46	96	27
9	20200405	3.13	-84	16	25	20201014	26.36	108	25
10	20200417	44.86	-72	27	26	20201026	17.53	120	25
11	20200429	54.98	-60	25	27	20201107	42.48	132	27

(续表)

12	20200511	-12.79	-48	24	28	20201201	-77.62	156	19
13	20200523	19.67	-36	25	29	20201213	-44.47	168	20
14	20200604	-77.50	-24	32	30	20201225	-57.63	180	17
15	20200616	12.39	-12	34	31	20210106	-44.81	192	15
16	20200628	0.00	0	30					

表 B.3 影像集 SET-A3 信息

No.	影像日期	B (m)	t (d)	T (°C)	No.	影像日期	B (m)	t (d)	T (°C)
1	20210106	3.51	-216	15	15	20210623	-14.00	-48	26
2	20210118	43.68	-204	15	16	20210705	53.91	-36	32
3	20210130	60.99	-192	18	17	20210717	102.98	-24	31
4	20210211	47.20	-180	19	18	20210729	-14.46	-12	30
5	20210223	15.91	-168	22	19	20210810	0.00	0	30
6	20210307	16.71	-156	18	20	20210822	30.96	12	31
7	20210319	7.86	-144	25	21	20210903	60.75	24	29
8	20210331	1.68	-132	25	22	20210927	120.20	48	28
9	20210412	78.41	-120	27	23	20211009	50.09	60	28
10	20210424	50.13	-108	25	24	20211021	42.79	72	21
11	20210506	63.99	-96	25	25	20211102	-9.86	84	23
12	20210518	8.14	-84	28	26	20211114	61.34	96	20
13	20210530	37.93	-72	25	27	20211220	13.96	132	20
14	20210611	54.70	-60	32					

表 B.4 影像集 SET-A4 信息

No.	影像日期	B (m)	t (d)	T (°C)	No.	影像日期	B (m)	t (d)	T (°C)
1	20211220	-49.67	-204	20	16	20220724	45.88	12	34
2	20220101	-109.02	-192	17	17	20220805	103.86	24	31
3	20220125	-23.97	-168	19	18	20220817	54.64	36	32
4	20220206	-9.40	-156	14	19	20220829	-16.28	48	31
5	20220314	-18.83	-120	25	20	20220910	77.17	60	26
6	20220326	57.98	-108	20	21	20220922	-288.64	72	25
7	20220407	-42.51	-96	20	22	20221004	24.26	84	30
8	20220419	15.77	-84	16	23	20221028	43.37	108	22
9	20220501	-11.19	-72	17	24	20221109	-140.16	120	26
10	20220513	60.88	-60	26	25	20221121	48.14	132	24

(续表)

11	20220525	-90.88	-48	22	26	20221203	-10.38	144	22
12	20220606	118.50	-36	25	27	20221215	-56.13	156	18
13	20220618	-21.18	-24	31	28	20221227	-28.86	168	16
14	20220630	-21.30	-12	31	29	20230108	-72.57	180	20
15	20220712	0.00	0	31					

表 B.5 影像集 SET-A5 信息

No.	影像日期	B (m)	t (d)	T (°C)	No.	影像日期	B (m)	t (d)	T (°C)
1	20230108	-84.53	-156	20	19	20230812	-125.89	60	30
2	20230120	-186.62	-144	15	20	20230824	31.64	72	30
3	20230201	-69.48	-132	19	21	20230905	79.85	84	30
4	20230213	-20.22	-120	18	22	20230917	28.12	96	29
5	20230225	-31.93	-108	13	23	20230929	-13.97	108	28
6	20230309	-114.99	-96	19	24	20231011	-208.54	120	25
7	20230321	-75.32	-84	25	25	20231023	69.82	132	25
8	20230402	8.62	-72	21	26	20231104	-7.57	144	27
9	20230414	80.93	-60	26	27	20231116	32.37	156	19
10	20230426	-22.87	-48	19	28	20231128	-114.58	168	21
11	20230508	30.46	-36	20	29	20231210	-19.34	180	24
12	20230520	39.62	-24	25	30	20231222	-169.33	192	12
13	20230601	51.17	-12	28	31	20240103	-50.15	204	14
14	20230613	0.00	0	28	32	20240115	-49.13	216	17
15	20230625	71.05	12	31	33	20240127	17.30	228	13
16	20230707	33.72	24	34	34	20240208	-73.87	240	13
17	20230719	-55.67	36	28	35	20240220	-19.00	252	26
18	20230731	-18.48	48	30					

表 B.6 影像集 SET-D 信息

No.	影像日期	B (m)	t (d)	T (°C)	No.	影像日期	B (m)	t (d)	T (°C)
1	20230110	170.98	-180	19	19	20230814	129.49	36	29
2	20230122	-25.86	-168	18	20	20230826	11.46	48	27
3	20230203	-22.17	-156	16	21	20230907	49.17	60	27
4	20230215	256.64	-144	13	22	20230919	10.57	72	28
5	20230227	34.08	-132	13	23	20231001	-22.10	84	25
6	20230311	84.99	-120	16	24	20231013	132.44	96	23

(续表)

7	20230323	69.79	-108	21	25	20231025	125.73	108	24
8	20230404	48.48	-96	21	26	20231106	89.29	120	22
9	20230416	38.39	-84	21	27	20231118	-62.26	132	13
10	20230428	45.93	-72	23	28	20231130	62.11	144	17
11	20230510	120.77	-60	23	29	20231212	-77.08	156	18
12	20230522	31.82	-48	21	30	20231224	79.29	168	14
13	20230603	2.92	-36	27	31	20240105	71.94	180	16
14	20230615	-3.00	-24	25	32	20240117	171.32	192	16
15	20230627	243.08	-12	29	33	20240129	6.53	204	17
16	20230709	0.00	0	29	34	20240210	2.80	216	8
17	20230721	11.79	12	28	35	20240222	0.55	228	14
18	20230802	220.70	24	28					

表 B.7 昆仑公寓分析影像集信息

No.	影像日期	B (m)	t (d)	T (°C)	No.	影像日期	B (m)	t (d)	T (°C)
1	20141009	22.58	144	12.82	12	20151109	46.64	252	1.57
2	20141114	131.70	108	-2.39	13	20151121	25.92	264	0.06
3	20141208	-65.47	-84	-5.61	14	20151215	-57.76	288	-0.65
4	20140101	-4.38	-60	-7.73	15	20160120	18.89	314	-7.59
5	20150125	-54.42	-36	-1.66	16	20160213	38.24	348	0.97
6	20150326	154.80	24	7.17	17	20160225	-19.47	360	-2.94
7	20150525	27.95	84	24.44	18	20160308	-44.53	372	-1.90
8	20150618	-11.88	108	27.38	19	20160320	-8.83	384	4.78
9	20150724	11.95	-144	25.55	20	20160413	66.89	408	11.57
10	20150910	21.54	192	19.24	21	20160531	21.52	456	25.62
11	20151004	42.90	216	13.48					

表 B.8 长沙市分析影像集信息

No.	影像日期	B (m)	t (d)	T (°C)	No.	影像日期	B (m)	t (d)	T (°C)
1	20211105	-72.66	-396	18.56	27	20221007	-76.10	-60	12.90
2	20211117	-32.55	-384	14.03	28	20221112	-44.47	-24	18.46
3	20211129	-0.89	-372	15.71	29	20221124	108.50	-12	16.81
4	20211211	39.98	-360	11.25	30	20221218	-54.08	12	5.96
5	20211223	-50.60	-348	14.05	31	20221230	27.09	24	7.63
6	20220104	-53.96	-336	9.82	32	20230111	-162.30	36	14.38

(续表)

7	20220116	-58.78	-324	7.71	33	20230123	40.00	48	7.07
8	20220128	-65.60	-312	2.32	34	20230204	-22.09	60	5.38
9	20220209	3.91	-300	4.20	35	20230216	-146.90	72	10.02
10	20220221	66.04	-288	4.09	36	20230228	66.79	84	14.53
11	20220305	-1.24	-276	15.00	37	20230312	5.58	96	16.25
12	20220317	-63.83	-264	11.57	38	20230324	-2.68	108	11.22
13	20220329	-2.482	-252	18.04	39	20230405	-78.82	120	12.48
14	20220410	-19.14	-240	26.61	40	20230417	-1.77	132	30.19
15	20220422	51.89	-228	21.57	41	20230429	100.60	144	19.16
16	20220504	-153.5	-216	23.39	42	20230511	15.31	156	18.66
17	20220516	8.11	-204	19.64	43	20230523	-22.56	168	17.85
18	20220528	7.93	-192	22.48	44	20230604	-13.25	180	27.60
19	20220609	118.00	-180	28.04	45	20230616	19.79	192	27.10
20	20220621	47.84	-168	27.70	46	20230628	-157.60	204	32.30
21	20220703	15.24	-156	27.42	47	20230710	125.90	216	34.14
22	20220715	-26.71	-144	33.80	48	20230722	40.83	228	29.87
23	20220727	-29.65	-132	32.17	49	20230815	-54.88	252	30.29
24	20220808	98.31	-120	34.48	50	20230827	110.30	264	22.62
25	20220913	95.11	-84	30.55	51	20230908	126.70	276	30.33
26	20220925	-169.5	-72	25.19	52	20230920	56.45	288	23.55

表 B.9 长沙市 CSK 影像集信息

No.	影像日期	B (m)	t (d)	T (°C)	No.	影像日期	B (m)	t (d)	T (°C)
1	20220927	72.00	-320	23	12	20230813	0.00	0	26
2	20221021	-119.52	-296	20	13	20230913	-415.18	31	22
3	20221122	-437.16	-264	14	14	20231008	-560.97	56	18
4	20221224	-710.80	-232	6	15	20231109	-712.75	88	16
5	20230116	-1312.0	-209	0	16	20231211	266.50	120	5
6	20230218	395.42	-176	11	17	20240112	-476.94	152	8
7	20230322	-364.97	-144	13	18	20240213	-1368.0	184	15
8	20230422	11.13	-113	10	19	20240314	297.77	214	13
9	20230525	444.37	-80	25	20	20240408	949.93	239	17
10	20230610	-754.38	-64	27	21	20240510	409.34	271	23
11	20230712	-412.11	-32	32					