引文格式:黄委彬,杨梦诗,赵志芳,等.星载InSAR数据驱动的城市建筑稳定性评估:以昆明市为例[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(8):1669-1681.DOI:10.13203/j.whugis20240427

Citation:HUANG Weibin,YANG Mengshi,ZHAO Zhifang,et al.Satellite-Based InSAR Data-Driven Urban Building Stability Assessment:A Case Study of Kunming City[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(8):1669-1681.DOI:10.13203/j.whugis20240427

星载InSAR数据驱动的城市建筑稳定性评估:以昆明市为例

黄委彬[1] 杨梦诗[1,2] 赵志芳[1,2] 刘朝海[2,3] 赵 飞[1] 刘 蕊[1]

1 云南大学地球科学学院,云南 昆明,650500

2 云南省中老孟缅自然资源遥感监测国际联合实验室,云南 昆明,650500

3 云南省遥感中心,云南 昆明,650034

摘 要:合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)技术可以提供周期性的地表形变监测,被广泛应用于城市地表沉降和基础设施形变监测,为城市安全与可持续发展提供了重要保障。创新性地探讨了InSAR技术测量的形变信号与建筑稳定性之间的映射关系,提出了两项指标:基于建筑物形变强度特征构建的均方根速率指标和根据建筑物形变分布建立的速率分布指数指标,发展了基于InSAR形变数据驱动的建筑稳定性评估框架,通过整合形变信号与建筑物结构特性,实现对城市建筑稳定性的大规模、系统化评估。以中国云南省昆明市为研究区,收集了106景高分辨率TerraSAR-X影像验证方法的有效性。实验结果表明,昆明市区86.96%的建筑物处于安全状态,8.37%的建筑物需重点关注,4.2%的建筑物存在潜在风险,仅有0.47%的建筑物显示出较高的风险。研究还揭示了建筑稳定性受到工程建设活动和建筑物自身结构特征(如高度、设计等)的显著影响,尤其在工程建设频繁区域,高层建筑的稳定性普遍较差。此结果为高风险建筑的识别提供了科学依据,为未来城市基础设施的智能监测与风险评估奠定了坚实的基础。

关键词:时序InSAR;星载InSAR;建筑物稳定性评估;数据驱动

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-02-13

DOI:10.13203/j.whugis20240427 **文章编号**:1671-8860(2025)08-1669-13

Satellite-Based InSAR Data-Driven Urban Building Stability Assessment: A Case Study of Kunming City

HUANG Weibin[1] *YANG Mengshi*[1,2] *ZHAO Zhifang*[1,2] *LIU Chaohai*[2,3]
ZHAO Fei[1] *LIU Rui*[1]

1 School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China

2 Yunnan International Joint Laboratory of China-Laos-Bangladesh-Myanmar, Natural Resources Remote Sensing Monitoring, Kunming 650500, China

3 Yunnan Remote Sensing Center, Kunming 650034, China

Abstract: **Objectives**: Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology, as an efficient tool for urban deformation monitoring, has been widely applied to surface subsidence and infrastructure deformation monitoring, providing support for urban safety and sustainable development. **Methods**: This study innovatively explores the relationship between displacement signals measured by PS-InSAR and building stability, proposing two key indicators: The root mean square rate indicator based on building deformation intensity characteristics, and the rate distribution index constructed from the spatial distribution of building deformations. A PS-InSAR data-driven framework for building stability assessment is developed, which integrates deformation signals with

基金项目:国家自然科学基金(42474040);云南省基础研究计划(202301AT070145,202201AU070014);云南省"兴滇英才"青年人才引进项目。

第一作者:黄委彬,硕士,研究方向为InSAR在城市基础设施监测中的应用。bin_ynu@foxmail.com

通信作者:杨梦诗,博士,副教授。yangms@ynu.edu.cn

building structural characteristics to enable large-scale, systematic evaluations of urban building stability. This study collects 106 high-resolution TerraSAR-X images over Kunming City, Yunnan Province, China, to assess the effectiveness of the proposed framework for large-scale urban building stability evaluation. **Results:** The experimental results indicate that 86.96% of the buildings in Kunming's urban area are classified as stable, while 8.37% exhibit minor deformations that warrant closer monitoring, and 4.2% are categorized as potentially unstable, necessitating more detailed investigation. Only 0.47% of the buildings were found to be at high risk. **Conclusions:** The analysis further highlights that building stability is profoundly influenced by factors such as ongoing construction activities and the structural characteristics of the buildings (e.g., height). Specifically, high-rise buildings in regions with frequent construction tend to display poorer stability, which suggests a need for targeted monitoring in such areas. These findings provide a robust scientific basis for identifying buildings at risk and offer valuable insights for urban planning, risk management, and engineering decision-making processes, thereby contributing to the development of proactive infrastructure management strategies.

Key words: time-series InSAR; spaceborne InSAR; urban stability evaluation; data-driven

随着城市化进程加快,城市建设与发展不断增加建筑负荷。一方面,工程建设活动、土地资源利用以及地下空间的开发影响城市地质环境的稳定性,地面沉降等城市灾害严重威胁着城市建筑的安全[1-2]。另一方面,早期城市规划不合理、建设技术的不成熟,大量老旧建筑不均匀分布于城市建成区中,随着时间的推移,这些建筑逐渐显露出更多的安全隐患[3]。因此,大范围高效地监测城市建筑物的形变并进行稳定性评估,是城市建设过程中的一项重要工作。

目前,针对建筑的稳定性监测网依赖于地面测量传感器,实现建筑物本体基于点的稀疏观测。监测系统安装和维护成本高,并且地面监测仪器往往需要在建筑本体安设仪器,易造成建筑本体的损耗,更难以满足建筑物本体及其赋存场景的大范围、动态实时监测的需求[4-5]。合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)是一种高精度监测地表形变技术,它可以实现大空间尺度下全天候、全天时的地表形变长期连续监测,监测效率高,且无需直接接触监测目标[6-9]。文献[10]首次提出永久散射体(persistent scatterer,PS) InSAR技术。PS-InSAR技术在城市场景能够提取大量高精度的形变监测点,这些监测点分布在城市地表和建筑物表面,可实现对城市基础设施形变的广泛监测。当前PS-InSAR技术及其衍生技术已被广泛应用于城市各类基础设施的监测中,在建筑[11-16]、桥梁[17-19]、交通路网[20-24]、机场[25-27]等基础设施监测中发挥了重要作用。

然而,InSAR所测量结果在城市场景解译,对于缺乏InSAR技术背景的用户难以使用,存在结果输出转化问题[28-30]。建筑稳定性指的是建筑物在其使用期限内能够维持结构安全和功能完整性,承受外部和内部因素的能力。InSAR技术能够监测建筑表面形变,但其并不代表建筑的整体稳定性。而在建筑评估中,稳定性通常使用预设的一套等级指标评价,旨在简明扼要地描述建筑的稳定性状态[31]。因此,为实现建筑形变到稳定性的语义转换,往往需要定义反映建筑稳定性的指标[32-35]。在已有研究中,建筑稳定性评估方法分为对象驱动和数据驱动,对象驱动的稳定性评估专注于具体建筑的系统分析[36-37];而数据驱动的稳定性评估方法关注大范围区域,通过定义指标与阈值快速识别需要关注的异常建筑,旨在对建筑异常形变的快速检测,并不需要预知建筑细节[38-40]。

目前数据驱动的建筑稳定性评估研究中,在城市表面形变数据与建筑结构稳定评估视角的转换表达方法上存在显著的提升潜力。本文将建立InSAR形变数据信号到建筑结构稳定评估的实践,探讨InSAR测量的表面形变与建筑物稳定信息的表达映射关系,构建建筑稳定性评估指标,发展一种基于星载InSAR数据驱动的非侵入式大范围建筑稳定评估指标体系,旨在提供InSAR数据驱动的建筑稳定性评估方法的新思路,完善雷达遥感在建筑物稳定监测中的理论和方法。本研究实现了从技术数据到稳定性评估的转化,弥合了技术与应用之间的鸿沟,将复杂的形变数据转化为建筑稳定性分级评价(如安全、关注、风险),为城市管理者提供了直观、可操作的决策支持工具。

1 InSAR数据驱动的建筑稳定性评估

InSAR技术能够获取大范围高精度的地表形变信息。然而,由于城市建筑复杂的空间结构

以及 InSAR 相干点不确定性使得 InSAR 技术获取的城市表面形变信号解译充满挑战。已有的研究在城市表面形变数据与建筑结构稳定评估视角的转换表达上存在不足，未能充分利用 InSAR 技术获取的形变信息。

在建筑稳定性评估中，由于同一建筑通常包含多个 PS 点，逐一分析每个 PS 点的信息将会降低大范围稳定性评估的效率，因此有必要对这些 PS 点的形变信息进行合理集成，如何将多个建筑 PS 点的形变信息有效集成以反映建筑的形变特征成为关键。同时，InSAR 技术获取的 PS 点形变信息量丰富，包括时间与空间维度，合理选取与集成形变特征，不仅有助于识别建筑形变差异，而且能更精确地捕捉建筑可能存在的非均匀形变，提升评估的实用性与科学性。

本文首先基于 PS-InSAR 获取的形变 PS 点云，针对建筑对象进行 PS 点目标提取，探测并删除异常 PS 点，然后基于建筑 PS 点集属性信息构建均方根（root mean square，RMS）形变速率、速率分布指数、差异形变、角度畸变等建筑稳定性相关指标。

1.1　建筑 PS 点提取

首先基于 PS-InSAR 技术提取城市表面形变[41]。PS-InSAR 技术获得的 PS 点云来自于城市各类地物，如道路、桥梁、建筑等。相同的形变信息在不同的地物上具有不同的涵义，因此有必要进行 PS 点云的分类。为此，本文结合建筑轮廓辅助数据，通过定义 PS 点与建筑轮廓的空间关系，利用空间连接与标识等方法提取建筑 PS 点（图 1）。考虑到 PS 点的散射特性和定位误差[42-43]，对每个建筑轮廓建立 5 m 的缓冲区。通过缓冲区，可以保留那些落在建筑外部但非常接近建筑边界的 PS 点，这些点可能是建筑墙体与地面形成的二次散射形成的。缓冲区的构建使得许多有效 PS 点被纳入分析中[44]。

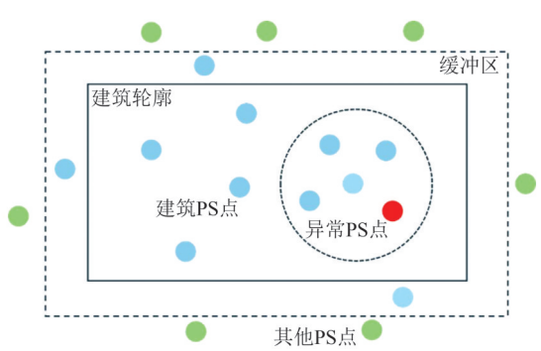


图 1　PS 点提取方法示意图

Fig. 1　Schematic of PS Points Extraction Method

在建筑物的稳定性评估中，假设同一结构的 PS 点具有相似的形变特征，可以利用这一特性来识别异常 PS 点[40]。本文采用了一种基于邻域统计分析的方法，首先定义每个 PS 点 P_i 的邻域 $N(P_i)$，其中邻域内的 PS 点满足：

$$N(P_i)=\left\{P_j:d\left(P_i,P_j\right)\leqslant\tau\right\} \tag{1}$$

式中，$d\left(P_i,P_j\right)$ 为 PS 点 P_i 与 P_j 的距离；τ 为邻域大小。在邻域内计算平均形变速率 V_{average} 与标准差 σ，若邻域内某个 PS 点 P_x 的形变速率 V_x 满足以下条件：

$$\left|V_x-V_{\text{average}}\right|>2\sigma \tag{2}$$

则该点被视为异常点并剔除。该方法通过利用建筑 PS 点性质，一定程度上减少由于相干性不足、大气效应、多路径反射、测量误差和建筑结构几何特性等引起的异常 PS 点影响，提升评估的准确性。

1.2　建筑稳定性指标构建

本文基于建筑 PS 点云集的形变速率的统计特征构建稳定性指标，包括均值、最大值、最小值等，构建 RMS 形变速率以及速率分布指数。RMS 形变速率提供了一种可靠的方法来综合多个 PS 点的形变速率信息，并反映建筑整体的形变速率强度[45]。该指标通过计算各个 PS 点的形变速率，并基于相干性加权来获得整个建筑的 RMS 形变速率。RMS 速率考虑不同方向的速率数值，从而更加准确地反映建筑物的整体形变特征。其计算公式如下：

$$V_{\text{RMS}}=\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}w_{C_i}V_i^2}{\sum_{i=1}^{N}w_{C_i}}\right)^{1/2} \tag{3}$$

式中，V_{RMS} 为每个建筑加权的 RMS 形变速率；V_i 为建筑第 i 个 PS 点的形变速率；w_{C_i} 是基于建筑第 i 个 PS 点相干性 C_i 的权重因子，定义如下：

$$w_{C_i}=(1-\epsilon_{\min})\frac{C_i-C_{\min}}{C_{\max}-C_{\min}}+\epsilon_{\min} \tag{4}$$

式中，$C_{\max}$ 和 $C_{\min}$ 是建筑 PS 点中最大和最小相干性；C_i 为第 i 个 PS 点的相干性；$\epsilon_{\min}$ 为最小权重值，设置为 0.2，以确保即使最低相干性的 PS 点仍有一定权重。

速率分布指数用于评估建筑 PS 点在建筑物内的形变速率分布[39]。该指数通过比较 PS 点的最大、最小和平均速率来量化形变速率的对称性。较高的值表示形变分布不均匀，表明局部可能存在显著的变形，而较低的值则表示形变分布

较为均匀。其计算公式如下:

$$I_{vd}=\frac{g}{G}=\frac{\max\{V_{\max}-V_{\mathrm{mean}},V_{\mathrm{mean}}-V_{\min}\}}{V_{\max}-V_{\min}} \quad (5)$$

式中,g表示建筑形变速率极值偏移程度;G表示建筑形变速率范围;$V_{\max}$、$V_{\min}$与V_{mean}分别是建筑PS点的最大形变速率、最小形变速率以及平均形变速率。

2 研究区与数据

选取中国云南省昆明市城市建成区为研究区,研究区共有两个覆盖范围的TerraSAR-X影像数据,其覆盖范围如图2所示,行政区划数据来自国家地理信息公共服务平台(审图号:GS(2024)0650)。其中,建筑主要集中于西山区、五华区、盘龙区、官渡区以及呈贡区靠近滇池部分。

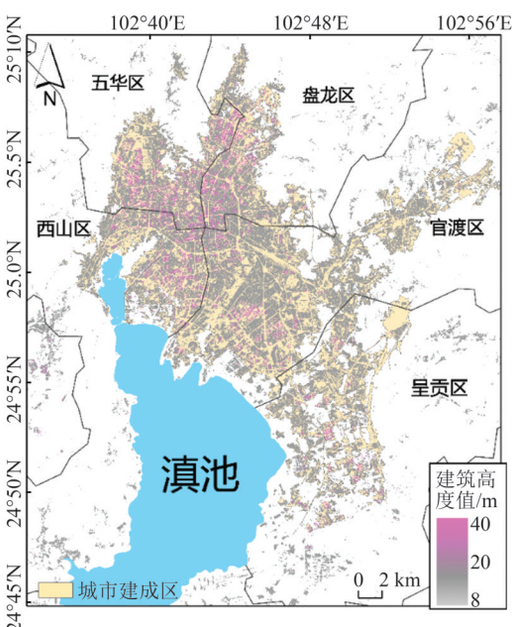


图2 研究区域位置,包括影像的空间覆盖范围、建筑分布以及高度信息

Fig. 2 Location of the Study Area, Including Spatial Coverage of the Images, Building Distribution and Height Information

本文收集了106景TerraSAR-X卫星降轨条带模式数据,数据时间跨度为2017-01-05—2019-08-31,极化方式为HH极化,波段长3.1 m,距离向分辨率为1.2 m,方位向分辨率为3.3 m,扫描模式为条带模式,入射角为25°。

3 结果与分析

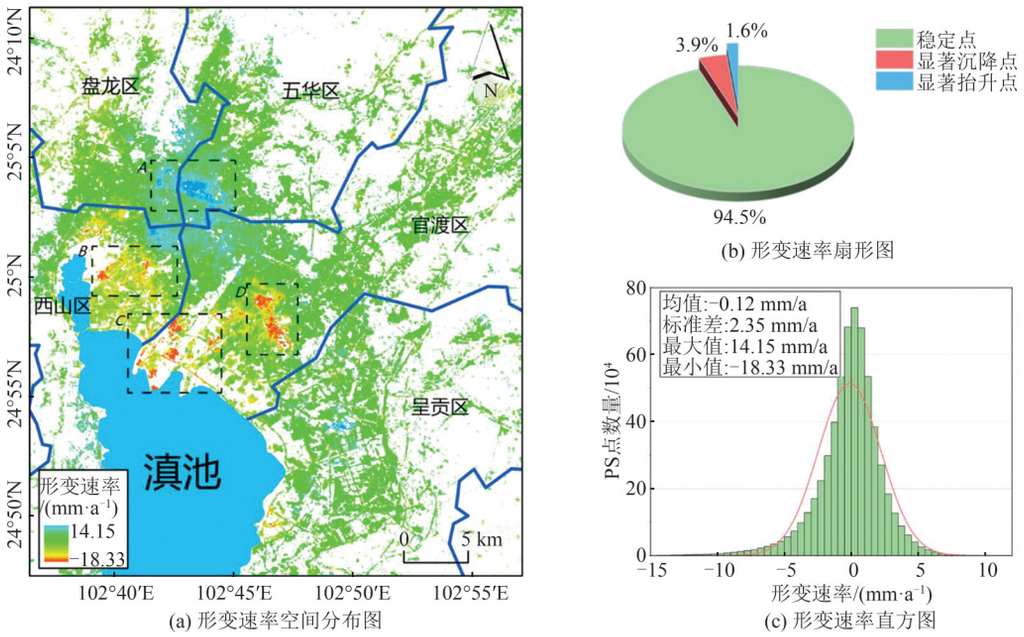
3.1 昆明地区InSAR形变空间分布

利用2017-01-05—2019-08-31 106景TerraSAR-X数据反演昆明市城区地表形变。已有研究指出,昆明市的形变由垂向形变主导,则视线向形变可分解到垂直方向[46]。根据所计算的形变速率均值与标准差,将大于两倍标准差的形变速率视为显著形变,其他视为稳定点,见图3,沉降形变速率为负值,用红色表示,抬升形变速率为正值,用蓝色表示。可见,昆明市城区有94.5%的PS点稳定,3.9%是显著沉降PS点,1.6%是显著抬升PS点,最大沉降速率为−18.33 mm/a,最大抬升速率为14.15 mm/a。

由图3(a)所示形变速率空间分布可得,昆明市滇池东北岸的变形严重,尤其是西山区和官渡区,靠近滇池区域。滇池岸边以沉积层为主,由大量软土和饱和粉砂砾石层组成,分布淤泥等沉积物。这类地层形成时间短,固结程度低,含水量高,因此该区域易发生地表沉降。且随着城市发展,滇池周边的工程建设活动频繁,建筑物和基础设施的建设极大地增加了地层负荷,导致软土、淤泥等沉积物中的水分在地下压力和温度的作用下被挤出并慢慢固结,从而导致地面沉降。由图3(a)可以看出,昆明市区主要有4个显著形变区域,其中,抬升区域包括A区处联盟街道-火车北站地铁站,最大抬升速率达到12 mm/a,并且平均抬升速率在6 mm/a左右,空间分布呈现聚集;沉降区域包括B处福海街道区域,存在两个沉降漏斗,最大沉降速率达到−12 mm/a,位于大坝地铁站附近;C处六甲街道以及官渡街道存在多个沉降漏斗,最大沉降速率达−15 mm/a,位于叶家村,靠近盘龙江;D处小板桥社区-新螺蛳湾区域,存在两个沉降漏斗,但是不同于B、C区域,该区域沉降漏斗范围大,形变速率大且集中。

3.2 建筑PS点提取结果与分析

基于§1.1介绍的建筑PS点提取方法,对获取的昆明市城区InSAR形变监测结果提取建筑PS点,并根据表1的密度分级标准对昆明市的建筑进行分级,结果如图4所示。基于InSAR数据的建筑监测中,PS点密度至关重要,影响着监测结果的精度和可靠性。在城市环境的建筑形变监测往往需要使用高分辨率的SAR数据,以保证对细微形变的识别能力。根据每平方千米的PS点密度,可分为极低密度、低密度、中密度、高密度、极高密度5个级别,如表1所示。



(a) 形变速率空间分布图　(b) 形变速率扇形图　(c) 形变速率直方图

图 3　昆明市城区地表形变速率反演结果

Fig. 3　Spatial Distribution of Surface Deformation Velocity Rate in Kunming Urban Area

表 1　PS 点密度分级

Table 1　PS Point Density Level

建筑 PS 点密度/(点·km^{-2})	级别
[0,1 000]	极低密度(E)
(1 000,3 000]	低密度(D)
(3 000,5 000]	中密度(C)
(5 000,10 000]	高密度(B)
＞10 000	极高密度(A)

PS 点的密度通常与数据的分辨率、观测区域的物理特性(如建筑密度和地表材料)密切相关，不同的建筑具有不同的 PS 点密度。首先根据建筑轮廓对原始 PS(图 5(a))提取得到建筑 PS 点(图 5(b))，大部分建筑无关的 PS 点被剔除。然后计算每个建筑的 PS 点密度，不同于 PS 点密度，该指标是通过统计每个建筑上的 PS 点数量，再除以建筑面积，得到建筑 PS 点密度，代表该建筑上每平方千米的 PS 点数量。通过表 1 定义的分级标准，对昆明市建筑 PS 点密度进行分级，其中低密度级别有 C、D、E，通过该指标可较好地检测低 PS 点密度的建筑，如图 5(c)、5(d)所示，剔除它们可提高稳定性评估的准确性。对整个昆明城区建筑提取建筑 PS 点，并计算其 PS 点密度。共 48 915 个建筑参与评估，其中低密度的建筑共有 2 827 栋，占 5.78%。可见，在昆明城区，使用 TerraSAR-X 数据提取建筑 PS 点并进行稳定性评估是有效且科学的。

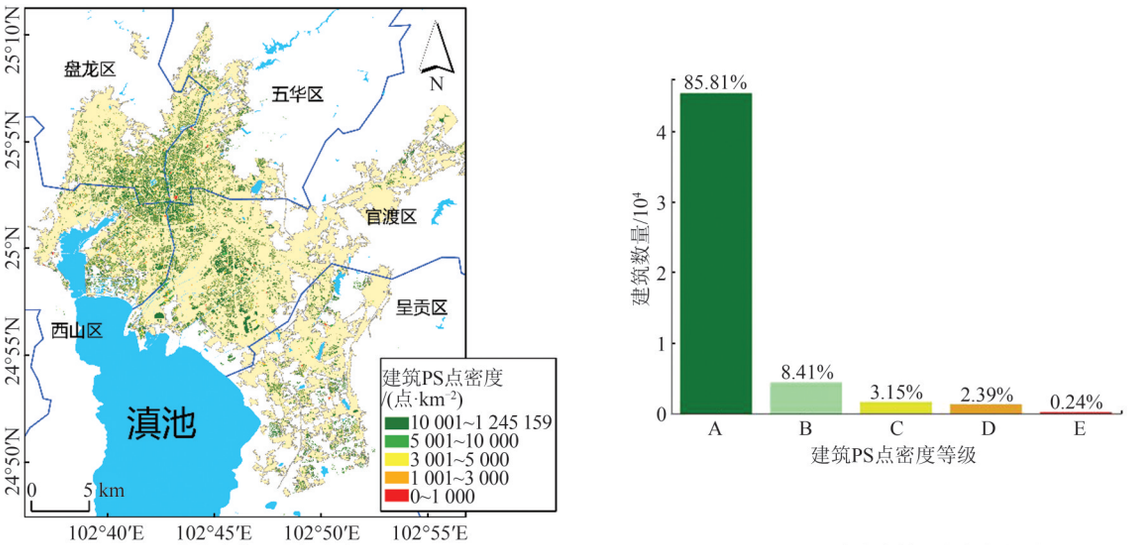
3.3　建筑稳定性评估结果与分析

基于§1.2 介绍的形变速率统计指标，开展建筑稳定性评估。昆明城区建筑的 RMS 形变速率以及速率分布指数的空间分布如图 6 所示，其中 RMS 揭示了建筑形变强度特征，速率分布指数体现建筑形变分布特征。可见，速率分布指数最小值为 0.5，此时建筑 PS 点的分布状态均匀，随着指数的增加，建筑形变的不均匀程度逐渐增加。

RMS 沉降速率分布(图 6(a))显示，昆明的大部分建筑沉降速率较低，主要以绿色为主，然而部分建筑的形变强度较大，这些建筑均处于昆明的几个沉降中心，与图 3 中昆明形变空间分布的 A、B、C、D 形变区相对应。速率分布指数分布(图 6(b))显示，昆明的大部分区域呈现出绿色，意味着大部分建筑物的沉降分布相对均匀，结构健康状况较为稳定。只有少数建筑速率分布指数在 0.7 之上，这些建筑可能存在不均匀沉降。

图 7 为 RMS 形变速率和速率分布指数的统计分布直方图。由图 7(a)得，RMS 沉降速率分布呈右偏，并且 75% 分位数为 3.51 mm/a，说明大部分建筑的 RMS 沉降速率在 0～3 mm/a 之间，这表明昆明大多数建筑沉降速率较低，相对稳定。由图 7(b)得，速率分布指数分布也呈右偏，数值在 0.5～0.6 的建筑较多，其中 75% 分位数小于均值的两倍标准差，表明昆明市大部分建筑存在轻度不均匀，少部分建筑的不均匀程度较高。

根据 RMS 形变速率及速率分布指数的均



(a) PS点密度等级空间分布 (b) PS点密度等级分布直方图

图4 昆明市城区建筑PS点密度级别分布结果

Fig. 4 Density Level Distribution Results of Building PS Points in Kunming Urban Area

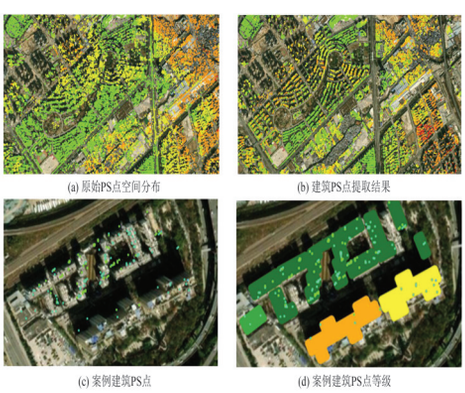


图5 建筑PS点提取以及PS点密度分级案例

Fig. 5 Architectural PS Point Extraction and PS Point Density Grading Cases

值与标准差,设置RMS形变速率的风险阈值为4.5 mm/a,速率分布指数的风险阈值为0.7。综合这两个指标,能够多角度评估建筑物的形变速率特征,既能捕捉建筑物整体的形变趋势,也能识别建筑局部的速率差异,进而更加全面地反映建筑的稳定性状态。因此,本文综合RMS形变速率及速率分布指数,定义4种建筑形变类型,如表2所示[39,44-45]。

对昆明市各个区进行统计分析,结果如图8所示。参与评估的建筑共48 195栋,86.96%的建筑稳定性评估为R1类型,8.37%的建筑为R3类型,4.2%的建筑为R2类型,0.47%的建筑为R4类型。

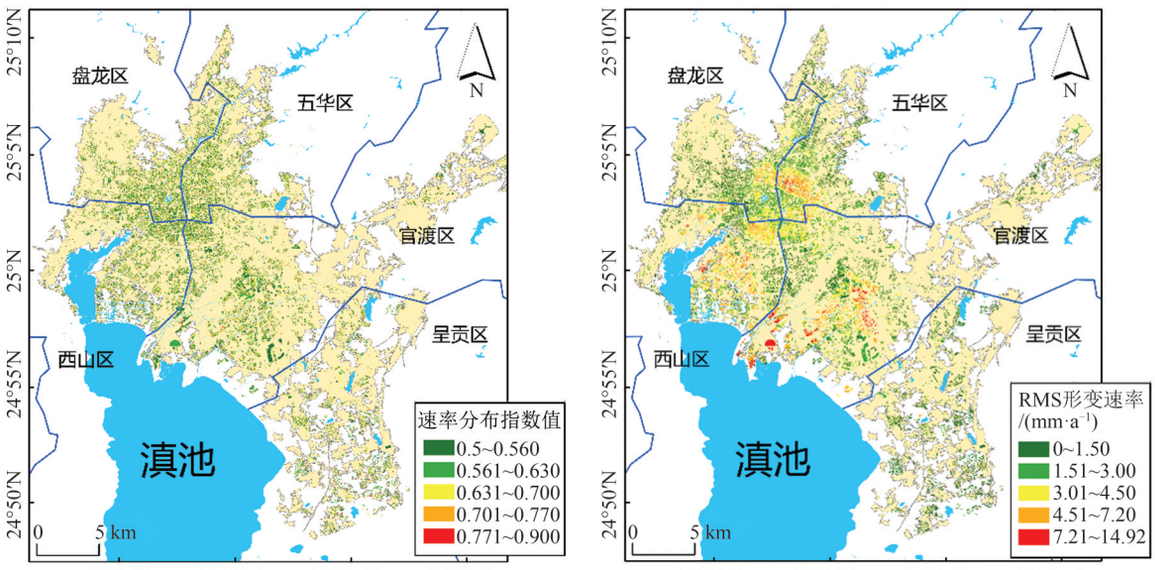
R1类型:建筑物的整体形变水平较低,且各区域之间的形变差异较小,显示出良好的均匀性,因此通常被认为处于稳定状态,无需进行额外维护,稳定性评估等级为安全。

R2类型:建筑尽管整体形变程度较低,但在不同区域之间存在较显著的形变差异。这类建筑物需进行局部监测,以识别潜在的结构隐患,从而确保其长期使用的安全性和稳定性,但由于形变点的形变速率较低,稳定性评估等级为注意。

R3类型:建筑物整体具有较高的形变速率,但建筑物的不同区域之间形变差异较小,显示出相对均匀的形变模式。这意味着尽管建筑物存在较大的形变风险,但由于形变分布较为均匀,局部受损的可能性相对较低,因此其风险评估和维护策略与R3类型建筑物有所不同。由于该类型建筑具有较高的形变速率,形变均匀,建筑可能发生整体性沉降或抬升,并且可能进一步恶化,因此建筑稳定性评估为关注。

R4类型:建筑物不仅整体形变水平较高,而且在不同区域之间的形变差异显著,显示出较大的不均匀性。此类建筑物在结构稳定性方面存在较高风险,亟需进行详细评估与干预,以识别和缓解可能的安全隐患,从而确保建筑物及其周围环境的安全性,因此建筑稳定性评估为风险。

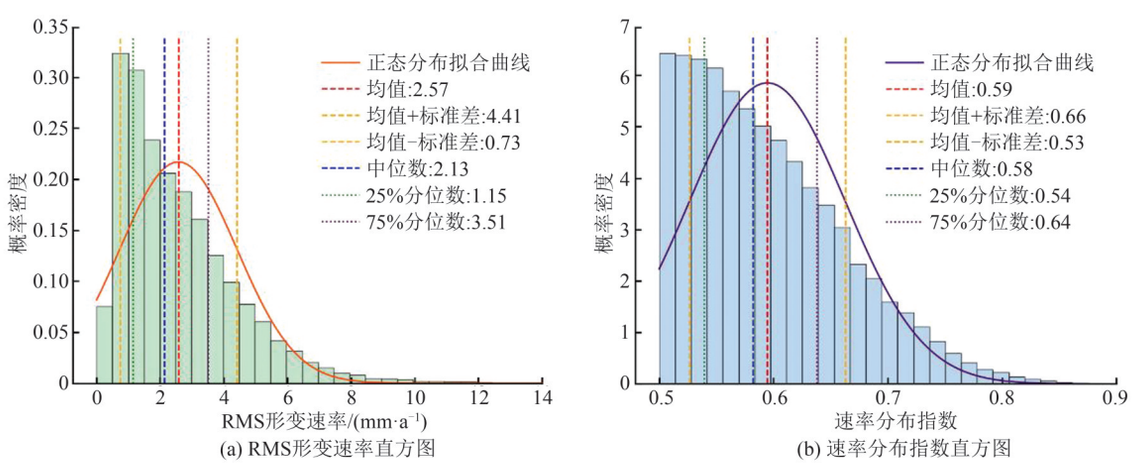
图8是综合建筑稳定性评估结果,通过建筑形变类型的定义,能够更好地评估建筑稳定性。值得注意的是,R3与R4这两种建筑沉降类型的RMS形变速率在4.5 mm/a以上,表明形变强度大,其中R4类型的速率分布指数大于0.7,表明在形变强度大的背景下,建筑存在严重不均匀形变,因此,需要重点关注R3与R4类型。由图9可得,昆明市大部分建筑属于R1类型,其中R2类型在空间上呈现离散分布,R3类型在空间上呈现聚集类型,而R3类型中会产生稳定性更差的



(a) 速率分布指数结果　　(b) RMS形变速率分布

图 6　RMS形变速率分布和速率分布指数

Fig. 6　RMS Deformation Velocity Distribution and Building Velocity Distribution Index



(a) RMS形变速率直方图　　(b) 速率分布指数直方图

图 7　RMS形变速率和速率分布指数直方图

Fig. 7　Histograms of RMS Deformation Velocity and Velocity Distribution Index

表 2　建筑形变类型及其稳定性等级

Table 2　Types of Building Deformation and Their Stability Levels

类型	RMS形变速率/(mm·a^{-1})	速率分布指数	稳定性评估等级
R1	[0,4.5]	[0.5,0.7)	安全
R2	[0,4.5]	[0.7,1]	注意
R3	>4.5	[0.5,0.7)	关注
R4	>4.5	[0.7,1]	风险

R4类型。

基于形变速率的建筑稳定性评估方法能够更细致地反映不同建筑的形变特征和风险水平。通过集成RMS形变速率与形变速率分布指数两个指标，可区分整体形变以及非均匀形变等形变类型。整体形变反映建筑区域的形变特征，以及地质因素引起的建筑地基下沉，而非均匀形变反映建筑结构上的受力不均匀。具体来说，非均匀形变会在建筑结构产生应力集中，当这些应力超过材料强度极限时，就会产生裂缝。

通过这种基于形变速率稳定性评估指标的形变模式分类，决策者可以制定更为精准的管理策略，以应对特定类型建筑的潜在风险，从而提高城市安全性和可持续发展水平。

4　建筑稳定性影响因素分析

4.1　工程建设活动的影响

基于建筑稳定性评估结果，以火车北站地铁站区域附近建筑为例，分析建筑稳定性影响因素。图 10 显示了火车北站地铁站区域附近形变

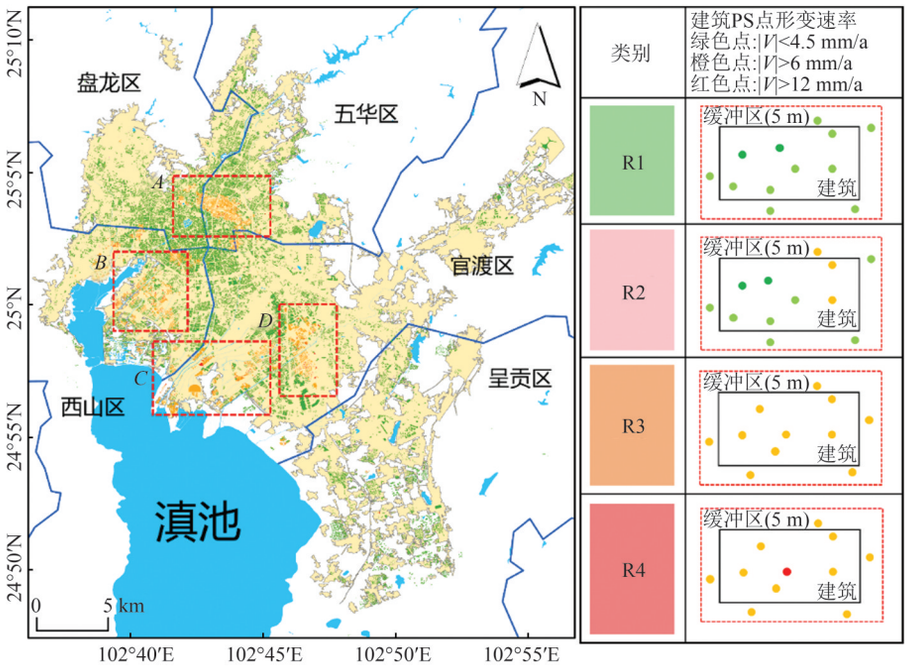
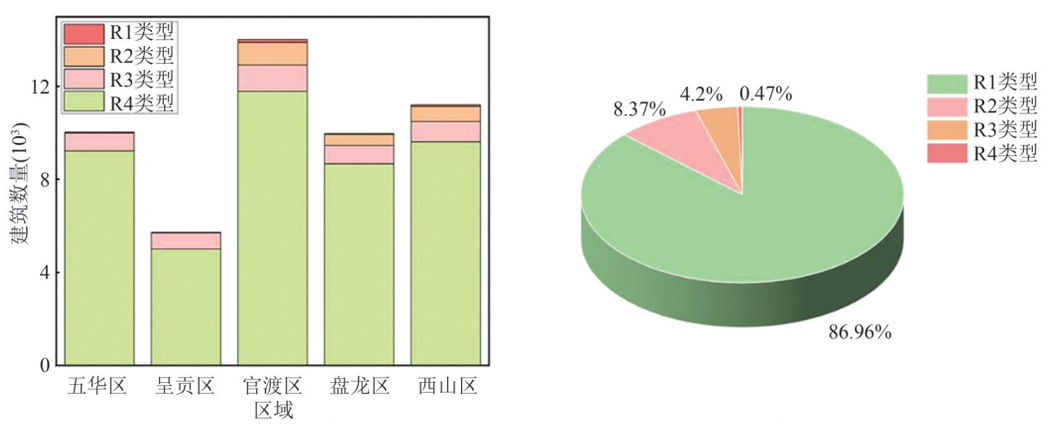


图8 形变建筑稳定性评估结果

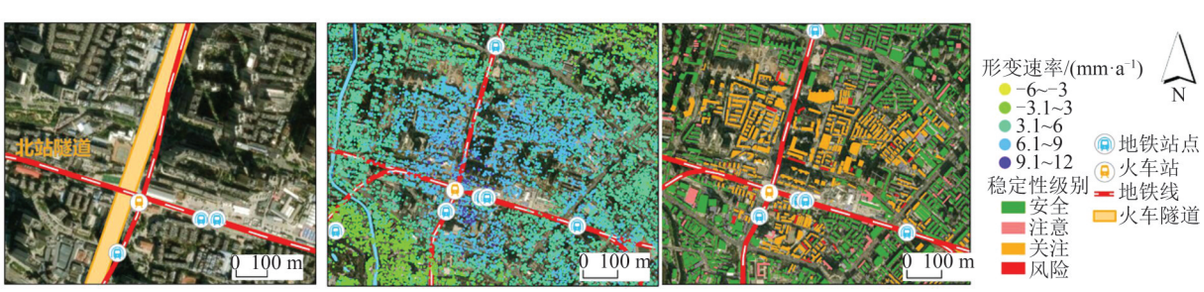
Fig. 8 Result of Building Stability Assessment



(a) 不同类型建筑堆叠条形图 (b) 不同类型建筑扇形图

图9 昆明城区建筑形变类型分布结果

Fig. 9 Statistical Results of Building Deformation Types in Kunming Urban Area



(a) 卫星影像 (b) 形变速率分布图 (c) 稳定性级别

图10 昆明北站区域建筑稳定性及其形变特征

Fig. 10 Stability of Buildings and Their Deformation Characteristics in the Area of Kunming North Station

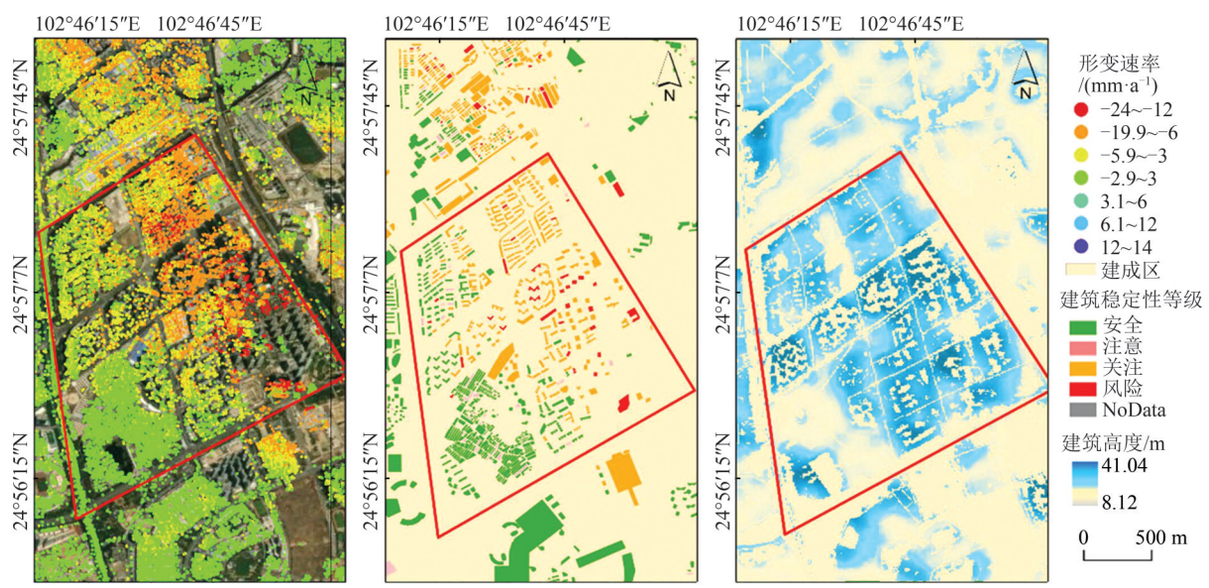
速率及其建筑稳定性等级。火车北站地铁站区域沿地铁施工线路两侧的建筑物形变尤为显著,表现出较高的形变速率和累积沉降量。施工引发的应力变化导致这些建筑物基础沉降或局部抬升,产生不均匀形变,增加了结构应力集中和倾斜的风险。部分建筑物在稳定性等级上被标记为关注或风险级别,显示出结构的潜在不稳定性。火车北站地铁站是一个三线换乘的地铁

站，该区域的地铁施工活动频繁，38.6 m 深的基坑开挖和盾构隧道建设对周边建筑物的稳定性产生了显著影响。由于基坑距离周边建筑仅 7.5 m，施工的影响范围很容易延伸至这些建筑的地基。泥炭土层的高压缩性和易变性使得基坑开挖过程中释放的应力导致地基土体发生回弹效应，进而引发不均匀的抬升和沉降。

综上所述，由于泥炭土层的特性和基坑开挖带来的应力变化，火车北站地铁站周边建筑物表现出明显的沉降和抬升形变。这种不均匀的地基形变是导致建筑稳定性下降的主要原因。通过综合监测和防护措施，可以有效维护地铁施工区域整体结构稳定性。

4.2　建筑本身特性的影响

建筑稳定性与工程建设活动的进行相关，但是建筑本身的结构特性（如设计、高度）也影响着其稳定性。由上文图 3 分析的结论可得到，小板桥-新亚洲体育城沉降十分严重，分布着大量工程建设项目，其沉降速率最大达 −15 mm/a。如图 11(a)所示，其中右下角部分数据缺失是由于该区域在数据采集期间有建筑建设，造成失相干，因此无形变速率。且通过图 11(c)建筑高度分布可得，该区域高层建筑主要集中于沉降漏斗中心附近，自西向东该区域的沉降并不均匀，因此该区域的建筑稳定性较差，如图 11(b)所示，特别是沉降漏斗附近建筑，部分建筑存在严重的不均匀沉降。



(a) 形变速率空间分布　(b) 稳定性等级空间分布　(c) 建筑高度空间分布

图 11　昆明新螺蛳湾沉降中心形变速率、建筑稳定性以及建筑高度空间分布

Fig. 11　Spatial Distribution of Deformation Velocity, Building Stability and Their Heights for the New Screw Bay Settlement Centre in Kunming

该区域建筑类型主要为住宅小区，其中右下角万科小区部分（图 12 中 *a* 地块）与俊发彩云辰湾（图 12 中 *c* 地块）在形变监测期间仍在建设。这块区域在 2017—2019 年是官渡区的城中村改造项目，其中广居路与广福路交叉口（如图 12 中 *b* 地块）将建造高层商业及超高层办公建筑，并且还准备进行地下空间的开发。

在高频工程建设活动的影响下，该区域的建筑稳定性较差，其中，由于建筑高度、结构等因素影响，高层建筑稳定性受到工程建设活动的影响在一定程度上更严重。左上角的建筑是商务中心，是一个高层建筑，建筑稳定性级别是 R4（风险），而右下角的建筑是药材市场，是一个低层建筑，稳定性等级为 R3（关注）。对比二者的具体各项建筑稳定性指标，结果如表 3 所示。其中，在该区域频繁的工程建设背景下，高层建筑的速率分布指数大于低层建筑。

由图 13 可得，高层建筑的形变速率直方图呈现偏态分布，表示其形变数值极其不均匀，而低层建筑的形变速率直方图接近正态分布，虽然存在一定空间的不均匀形变，但是其形变速率变化较为连续，建筑受到的结构健康影响较小，因此其稳定性较高。值得注意的是，高层建筑物的形变速率估计可能会受到残余高程相位的影响[47-48]。然而，本文基于统计分析中速率与高程值之间的相关系数为 0.2，表明本文结果受该影响较小，这可能与研究区域内高层建筑数量较少有关。

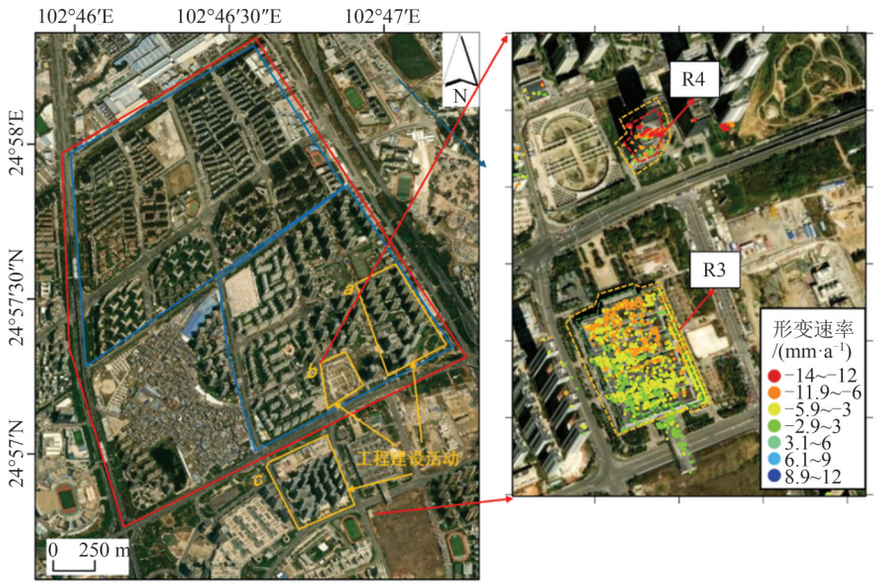


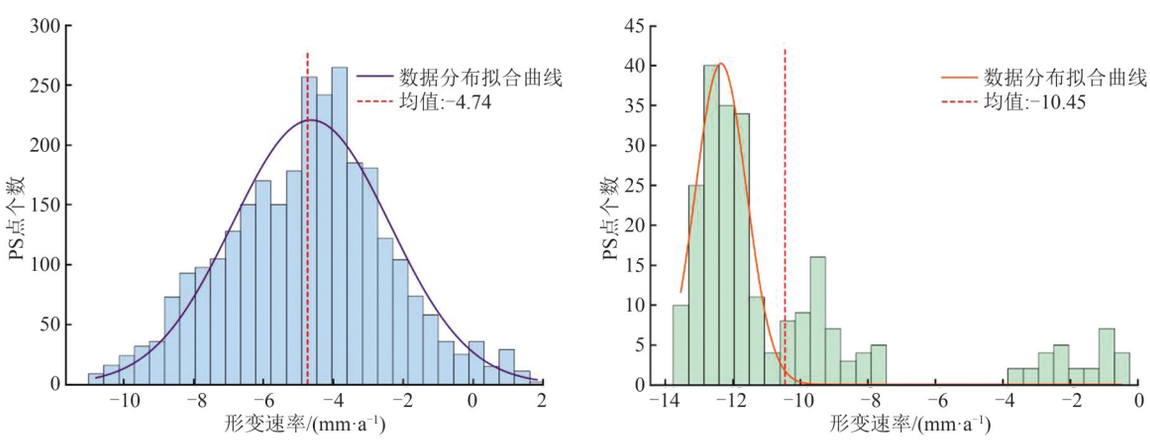
图12 工程建设背景下不同高度建筑对比图

Fig. 12 Comparison of Building with Different Heights in the Context of Engineering Construction

表3 高层建筑案例与低层建筑案例指标对比

Table 3 Metrics Comparison of High- and Low-Rise Cases

项目	建筑面积/m²	建筑高度/m	PS点密度/(点·km⁻²)	RMS形变速率/(mm·a⁻¹)	速率分布指数
高层建筑	7 067.11	31.41	0.029	11.03	0.76
低层建筑	57 289.37	14	0.06	5.23	0.51



(a) 低层建筑形变速率直方图 (b) 高层建筑形变速率直方图

图13 不同高度建筑形变速率直方图

Fig. 13 Histograms of Deformation Velocity Rates of Different Heights Buildings

5 结 语

随着城市化进程的加速,城市基础设施面临日益复杂的安全隐患和稳定性挑战。时序InSAR技术能够实现高精度的地表形变监测,为城市建筑的安全评估与可持续发展提供了关键支持。

本文构建了基于建筑物形变强度的RMS形变速率指标及基于形变分布的速率分布指数,并发展了InSAR形变数据驱动的建筑稳定性评估框架。基于2017—2019年昆明时序TerraSAR-X影像提取的建筑形变数据表明,昆明市地表形变分布不均,滇池东北岸沉降显著,尤以西山区与官渡区沉降漏斗明显,其中小板桥-新螺蛳湾区域沉降尤为集中;盘龙区昆明北站一带则出现大范围抬升。基于InSAR形变数据驱动框架,评估了昆明市城区48 195栋建筑。结果显示,86.96%的建筑物评级为安全,8.37%的需注意,4.2%的需关注,风险评级建筑占比仅0.47%。进一步分析发现,昆明北站抬升区及小板桥-新螺蛳湾沉降区的地下空间利用(如地铁隧道开挖)可能导致沉降,且工程活动频繁区的高层建筑稳定性低于低层建筑。

综上所述，本文提出的基于InSAR形变数据的建筑稳定性评估框架为城市建筑的大范围监测提供了一种高效、低成本的解决方案。该框架通过精准分析建筑物的形变数据，能够提前识别潜在的结构风险，帮助城市管理者在早期阶段采取预防措施。这一技术的应用将有助于提高建筑稳定性评估的准确性与实时性，为城市的安全管理和可持续发展提供可靠的技术支撑。随着星载InSAR技术精度和数据获取频率的提升，这一评估方法在城市防灾减灾和安全管理中的作用将更加显著。

致谢：感谢德国宇航中心提供TerraSAR-X数据集（ID MTH3869）；欧洲航天局在中欧合作“龙计划”6期框架下提供Sentinel-1/2数据集（ID 95473）。

参 考 文 献

[1] 魏子新，王寒梅，吴建中，等. 上海地面沉降及其对城市安全影响[J]. 上海地质，2009，30(1)：34-39.
WEI Zixin，WANG Hanmei，WU Jianzhong，et al. Land Subsidence and Its Influences on Urban Security of Shanghai[J]. *Shanghai Geology*，2009，30(1)：34-39.

[2] 肖和平. 城市地质灾害及对策[J]. 灾害学，2000(2)：39-43.
XIAO Heping. Urban Geological Hazards and Countermeasures[D]. *Disaster Science*，2000(2)：39-43.

[3] 周云，陈嘉豪，易伟建，等. 某砌体结构房屋倒塌事故分析与倒塌全过程仿真模拟[J]. 土木工程学报，2024，DOI：10.15951/j.tmgcxb.23121034.
ZHOU Yun，CHEN Jiahao，YI Weijian，et al. Analysis of a Masonry Structure House Collapse Accident and Simulation of the Whole Collapse Process[J]. *China Civil Engineering Journal*，2024，DOI：10.15951/j.tmgcxb.23121034.

[4] 周云，郝官旺，危俊杰，等. 基于PS-InSAR技术的大跨度桥梁结构变形监测综述[J]. 工程力学，2023，DOI：10.6052/j.issn.1000-4750.2022.12.1069.
ZHOU Yun，HAO Guanwang，WEI Junjie，et al. A Review on Structural Deformation Monitoring of Large-Span Bridges Based on PS-InSAR Technology[J]. *Engineering Mechanics*，2023，DOI：10.6052/j.issn.1000-4750.2022.12.1069.

[5] 朱茂，沈体雁，黄松，等. InSAR技术地铁沿线建筑物形变监测[J]. 国土资源遥感，2019，31(2)：196-203.
ZHU Mao，SHEN Tiyan，HUANG Song，et al. Research on Applications of InSAR Technology to the Deformation Monitoring of Buildings Along the Subway[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*，2019，31(2)：196-203.

[6] 廖明生，王腾. 时间序列InSAR技术与应用[M]. 北京：科学出版社，2014.
LIAO Mingsheng，WANG Teng. Time Series InSAR Technology and Its Application[M]. Beijing：Science Press，2014.

[7] 王超，张红，刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京：科学出版社，2002.
WANG Chao，ZHANG Hong，LIU Zhi. Spaceborne Synthetic Aperture Radar Interferometry[M]. Beijing：Science Press，2002.

[8] 刘国祥，陈强，罗小军，等. 永久散射体雷达干涉理论与方法[M]. 北京：科学出版社，2012.
LIU Guoxiang，CHEN Qiang，LUO Xiaojun，et al. Theory and Method of Radar Interferometry with Permanent Scatterers[M]. Beijing：Science Press，2012.

[9] 林珲，陈富龙，江利明，等. 多基线差分雷达干涉测量的大型人工线状地物形变监测[J]. 地球信息科学学报，2010，12(5)：718-725.
LIN Hui，CHEN Fulong，JIANG Liming，et al. Preliminary Research on Large-Scale Man-Made Linear Features Deformation Monitoring Using Multi-baseline Differential SAR Interferometry[J]. *Journal of Geo-Information Science*，2010，12(5)：718-725.

[10] FERRETTI A，PRATI C，ROCCA F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*，2001，39(1)：8-20.

[11] CHEN F L，XU H，ZHOU W，et al. Three-Dimensional Deformation Monitoring and Simulations for the Preventive Conservation of Architectural Heritage：A Case Study of the Angkor Wat Temple，Cambodia[J]. *GIScience & Remote Sensing*，2021，58(2)：217-234.

[12] TAPETE D，FANTI R，CECCHI R，et al. Satellite Radar Interferometry for Monitoring and Early-Stage Warning of Structural Instability in Archaeological Sites[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*，2012，9(4)：S10-S25.

[13] GERNHARDT S，AUER S，EDER K. Persistent Scatterers at Building Facades - Evaluation of Appearance and Localization Accuracy[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*，2015，100：92-105.

[14] GERNHARDT S，BAMLER R. Deformation Monitoring of Single Buildings Using Meter-Resolution SAR Data in PSI[J]. *ISPRS Journal of Photo-*

grammetry and Remote Sensing, 2012, 73: 68-79.

[15] PEDUTO D, NICODEMO G, CUEVAS-GONZÁLES M, et al. Analysis of Damage to Buildings in Urban Centers on Unstable Slopes via TerraSAR-X PSI Data: The Case Study of El Papiol Town (Spain)[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(11): 1706-1710.

[16] 刘振江, 韩炳权, 刘海辉, 等. InSAR数据约束下的2023年赫拉特地震序列发震断层探讨及其建筑物损毁评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(5): 722-733.
LIU Zhenjiang, HAN Bingquan, LIU Haihui, et al. Seismogenic Fault and Building Damage of the 2023 Herat Earthquake Sequence Revelated by Radar Interferometry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(5): 722-733.

[17] QIN X Q, ZHANG L, YANG M S, et al. Mapping Surface Deformation and Thermal Dilation of Arch Bridges by Structure-Driven Multi-temporal DInSAR Analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 216: 71-90.

[18] MA P F, LI T, FANG C Y, et al. A Tentative Test for Measuring the Sub-Millimeter Settlement and Uplift of a High-Speed Railway Bridge Using COSMO-SkyMed Images[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 155: 1-12.

[19] HUANG Q H, CROSETTO M, MONSERRAT O, et al. Displacement Monitoring and Modelling of a High-Speed Railway Bridge Using C-Band Sentinel-1 Data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 128: 204-211.

[20] XING X M, CHANG H C, CHEN L F, et al. Radar Interferometry Time Series to Investigate Deformation of Soft Clay Subgrade Settlement—A Case Study of Lungui Highway, China[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(4): 429.

[21] LAZECKY M, HLAVACOVA I, BAKON M, et al. Bridge Displacements Monitoring Using Space-Borne X-Band SAR Interferometry[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(1): 205-210.

[22] CHANG L, HANSSEN R F. Detection of Cavity Migration and Sinkhole Risk Using Radar Interferometric Time Series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 147: 56-64.

[23] 刘琦, 岳国森, 丁孝兵, 等. 佛山地铁沿线时序InSAR形变时空特征分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 1099-1106.
LIU Qi, YUE Guosen, DING Xiaobing, et al. Temporal and Spatial Characteristics Analysis of Deformation Along Foshan Subway Using Time Series InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1099-1106.

[24] 王茹, 杨天亮, 杨梦诗, 等. PS-InSAR技术对上海高架路的沉降监测与归因分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2050-2057.
WANG Ru, YANG Tianliang, YANG Mengshi, et al. Attribution Analysis on Deformation Feature of the Shanghai Elevated Highway by Persistent Scatterer SAR Interferometry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2050-2057.

[25] WU S B, YANG Z F, DING X L, et al. Two Decades of Settlement of Hong Kong International Airport Measured with Multi-temporal InSAR[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 248: 111976.

[26] DAI K R, SHI X L, GOU J S, et al. Diagnosing Subsidence Geohazard at Beijing Capital International Airport, from High-Resolution SAR Interferometry[J]. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2269.

[27] 张双成, 司锦钊, 徐永福, 等. 时序InSAR用于安康膨胀土机场稳定性监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1519-1528.
ZHANG Shuangcheng, SI Jinzhao, XU Yongfu, et al. Time-Series InSAR for Stability Monitoring of Ankang Airport with Expansive Soil[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1519-1528.

[28] 杨梦诗, 廖明生, 常玲, 等. 城市场景时序InSAR形变解译: 问题分析与研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1643-1660.
YANG Mengshi, LIAO Mingsheng, CHANG Ling, et al. Interpretation of Multi-epoch InSAR Deformation for Urban Scenes: A Problem Analysis and Literature Review[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1643-1660.

[29] 廖明生, 王茹, 杨梦诗, 等. 城市目标动态监测中的时序InSAR分析方法及应用[J]. 雷达学报(中英文), 2020, 9(3): 409-424.
LIAO Mingsheng, WANG Ru, YANG Mengshi, et al. Techniques and Applications of Spaceborne Time-Series InSAR in Urban Dynamic Monitoring[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(3): 409-424.

[30] 朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1717-1733.
ZHU Jianjun, LI Zhiwei, HU Jun, et al. Research Progress and Methods of InSAR for Deformation Monitoring[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica*

Sinica, 2017, 46(10): 1717-1733.

[31] WAHIDA R N, MILTON G, HAMADAN N, et al. Building Condition Assessment Imperative and Process [J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2012, 65: 775-780.

[32] LI Q, WANG W, WANG J F, et al. Exploring the Relationship Between InSAR Coseismic Deformation and Earthquake-Damaged Buildings [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 262: 112508.

[33] PEDUTO D, KORFF M, NICODEMO G, et al. Empirical Fragility Curves for Settlement-Affected Buildings: Analysis of Different Intensity Parameters for Seven Hundred Masonry Buildings in the Netherlands [J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(2): 380-397.

[34] MACCHIARULO V. Integration of Satellite Radar Interferometry and Civil Engineering Procedures to Assess Building and Infrastructure Conditions [D]. Bath, UK: University of Bath, 2022.

[35] LIU Y Z, CAO W X, SHI Z Q, et al. Evaluation of Post-Tunneling Aging Buildings Using the InSAR Nonuniform Settlement Index [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(14): 3467.

[36] CIAMPALINI A, SOLARI L, GIANNECCHINI R, et al. Evaluation of Subsidence Induced by Long-Lasting Buildings Load Using InSAR Technique and Geotechnical Data: The Case Study of a Freight Terminal (Tuscany, Italy) [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 82: 101925.

[37] LAN H X, LI L P, LIU H J, et al. Complex Urban Infrastructure Deformation Monitoring Using High Resolution PSI[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(2): 643-651.

[38] 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 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 282: 113294.

[39] PRATESI F, TAPETE D, TERENZI G, et al. Rating Health and Stability of Engineering Structures *via* Classification Indexes of InSAR Persistent Scatterers [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 40: 81-90.

[40] COSTANTINI M, ZHU M, HUANG S, et al. Automatic Detection of Building and Infrastructure Instabilities by Spatial and Temporal Analysis of InSAR Measurements [C]// 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 2018: 2224-2227.

[41] HOOPER A, SEGALL P, ZEBKER H. Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B7): B07407.

[42] YANG M S, LÓPEZ-DEKKER P, DHEENATHAYALAN P, et al. On the Value of Corner Reflectors and Surface Models in InSAR Precise Point Positioning [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 158: 113-122.

[43] DHEENATHAYALAN P, SMALL D, HANSSEN R F. 3-D Positioning and Target Association for Medium-Resolution SAR Sensors [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(11): 6841-6853.

[44] PEDUTO D, NICODEMO G, MACCABIANI J, et al. Multi-Scale Analysis of Settlement-Induced Building Damage Using Damage Surveys and DInSAR Data: A Case Study in the Netherlands [J]. *Engineering Geology*, 2017, 218: 117-133.

[45] CASCINI L, PEDUTO D, PISCIOTTA G, et al. The Combination of DInSAR and Facility Damage Data for the Updating of Slow-Moving Landslide Inventory Maps at Medium Scale[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, 13(6): 1527-1549.

[46] YANG M S, LI M H, HUANG C, et al. Exploring the InSAR Deformation Series Using Unsupervised Learning in a Built Environment [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(8): 1375.

[47] CROSETTO M, MONSERRAT O, CUEVAS-GONZÁLEZ M, et al. Measuring Thermal Expansion Using X-Band Persistent Scatterer Interferometry [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 100: 84-91.

[48] LIU P, LI Z H, WANG C S, et al. Phase Unmixing of TerraSAR-X Staring Spotlight Interferograms in Building Scale for PS Height and Deformation [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 180: 14-28.