引文格式:秦晓琼,胡炎杰,徐彬涛,等.联合时序InSAR与光学遥感的广州市建成区提取与风险分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(8):1583-1598.DOI:10.13203/j.whugis20240495

Citation:QIN Xiaoqiong,HU Yanjie,XU Bintao,et al.Urban Built-Up Area Extraction and Risk Analysis of Guangzhou City by Integrating Time-Series InSAR and Optical Remote Sensing[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(8):1583-1598.DOI:10.13203/j.whugis20240495

联合时序InSAR与光学遥感的广州市建成区提取与风险分析

秦晓琼[1,2] 胡炎杰[1] 徐彬涛[1] 陈睿豪[1] 谢林甫[1,3] 刘宇舟[2]
汪驰升[1,5] 李清泉[4,5]

1 深圳大学极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室,广东 深圳,518060
2 深圳市城市公共安全技术研究院有限公司城市安全风险监测预警应急管理部重点实验室,广东 深圳,518060
3 深圳大学亚热带建筑与城市科学全国重点实验室,广东 深圳,518060
4 人工智能与数字经济广东省实验室(深圳),广东 深圳,518107
5 深圳大学自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室,广东 深圳,518061

摘 要:超大城市承载着千万级人口规模,准确提取超大城市建成区并对其进行高效的沉降监测与风险分析,对于确保城市居民安全和未来可持续发展至关重要。联合Landsat光学遥感影像和Sentinel-1雷达卫星影像,应用最大似然监督分类方法和时序InSAR技术准确提取了中国广东省广州市2017年、2020年和2023年的城市建成区范围及地面沉降监测结果。在此基础上,联合建成区的沉降速率、不均匀沉降率、建筑点密度等风险指标构建层次分析模型,深入解析建成区的多时相沉降累积变化和点目标时空特征,并提出时空特征融合的城市建成区长期沉降风险评估方法,对广州市建成区的沉降风险等级进行了量化评估。研究表明,建成区提取精度达到91%以上,且演变契合城建规划发展趋势,其空间分布与InSAR点密度大于3×10^5个/km^2的区域分布具有高度一致性;其中,南沙和白云两区沉降较显著,局部区域年沉降速率最高可达到−67 mm/a;广州市建成区长期沉降风险分级结果表明,约1.69%的区域风险较高,值得关注。该研究可以为城市安全保障决策提供技术支撑,实现快速、低成本的城市大范围建成区定期风险筛查。

关键词:城市建成区;InSAR;土地分类;地面沉降;沉降风险评估

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-12-27

DOI:10.13203/j.whugis20240495 **文章编号**:1671-8860(2025)08-1583-16

Urban Built-Up Area Extraction and Risk Analysis of Guangzhou City by Integrating Time-Series InSAR and Optical Remote Sensing

QIN Xiaoqiong[1,2] *HU Yanjie*[1] *XU Bintao*[1] *CHEN Ruihao*[1] *XIE Linfu*[1,3] *LIU Yuzhou*[2]
WANG Chisheng[1,5] *LI Qingquan*[4,5]

1 State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China
2 Shenzhen Technology Institute of Urban Public Safety, and Key Laboratory of Urban Safety Risk Monitoring and Early Warning, Ministry of Emergency Management, Shenzhen 518060, China
3 State Key Laboratory of Subtropical Building and Urban Science, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China
4 Guangdong Laboratory of Artificial Intelligence and Digital Economy (Shenzhen), Shenzhen 518107, China
5 Key Laboratory for Geo-Environmental Monitoring of Great Bay Area, Ministry of Natural Resources, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China

Abstract: **Objectives**: Mega cities carry a population of tens of millions, and accurately extracting the

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC3807500);国家自然科学基金(42474021);深圳市基础研究面上项目(JCYJ20220531101812028);深圳市城市安全风险监测预警应急管理部重点实验室开放基金(YJY-23-YF-ZY012);自然资源部中国-东盟卫星遥感应用重点实验室开放资金;中欧"龙计划"6期项目(95436)。

第一作者:秦晓琼,博士,助理教授,主要从事城市安全监测与智能感知研究。xqqin@szu.edu.cn

通信作者:谢林甫,博士,助理教授。linfuxie@szu.edu.cn

built-up areas of mega cities and conducting efficient settlement monitoring and risk analysis is crucial for ensuring the safety of urban residents and future sustainable development. **Methods:** First, combined with the Landsat series optical images and Sentinel-1 radar images, the maximum likelihood supervised classification method and time-series interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology were used to accurately extract the urban built-up area and settlement monitoring results of Guangzhou in 2017, 2020, and 2023. On this basis, an analytic hierarchy process model was established based on risk indicators including settlement velocity, uneven settlement rate, and density of building points in built-up area. Moreover, a long-term settlement risk assessment method for urban built-up area integrating spatiotemporal characteristics was proposed, by analyzing the cumulative changes of multi-temporal settlement and the spatiotemporal characteristics of point targets in depth. Finally, the settlement risk level of the built-up area in Guangzhou was quantitatively evaluated. **Results:** The extraction accuracy of built-up areas can reach over 91%, and their evolution is in line with the development trend of urban construction planning. Their spatial distribution is highly consistent with the distribution of InSAR points with a density greater than 3×10^5 points/km^2. Among them, the settlement in Nansha and Baiyun areas is more significant, with the highest annual settlement velocity in some areas reaching −67 mm/a; the long-term settlement risk classification results of the research area indicate that about 1.69% of the areas have high risks and deserve attention. **Conclusions:** This study can provide data support for urban security decision-making and achieve rapid and low-cost regular risk screening of large-scale urban built-up areas.

Key words: urban built-up area; InSAR; land classification; surface settlement; settlement risk assessment

随着中国超大城市建设规模不断扩大,城市地面沉降现象也频繁发生[1],导致城市地面或建筑设施出现错位、裂缝、塌陷等问题,严重损害城市建成区的建筑物和生产设施结构健康,威胁人民生命财产安全[2-3]。建成区是指城市行政区内实际已成片开发建设、市政公用设施和公共设施基本具备的区域。因此,准确提取城市建成区并对其进行高效的地面沉降监测与风险分析,对于减轻地面沉降带来的不良影响,以及保障人民生命财产安全和城市可持续发展十分必要[4]。

目前,光学遥感分类技术可以高效获取大范围城市建设用地信息,其主要数据源包括夜光遥感和多光谱遥感影像[5-8]。然而,夜光遥感影像的空间分辨率普遍较低,当前广泛应用的DMSP/OLS和NPP/VIIRS空间分辨率分别仅为1 km和500 m[9-11],近年发射的珞珈一号(Luojia 1-01)夜光影像空间分辨率虽能达到130 m[12-13],但仍不满足建成区精确提取需求。相比之下,Landsat 8和9系列多光谱影像空间分辨率可达30 m,且相较于Sentinel-2和国产高分系列等卫星数据具有更大的影像覆盖范围、更好的时间连续性和可获取性,成为目前城市建成区提取的主要数据源[14-15]。

时序合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)干涉测量(interferometric SAR,InSAR)技术具有人力、物力低成本、高精度、大范围监测等突出优势,在城市建成区形变监测中应用广泛。2005年,中欧“龙计划”合作项目启动,时序InSAR技术被成功应用于中国多个城市建成区的扩张分析及大型建成区设施变形监测研究中[16]。近年来,研究人员也将时序InSAR技术应用于粤港澳大湾区[17-19]、京津冀[20-22]、长三角[23-24]、武汉[25]、郑州[26]、兰州[27]等城市或城市群建成区的沉降监测研究中。

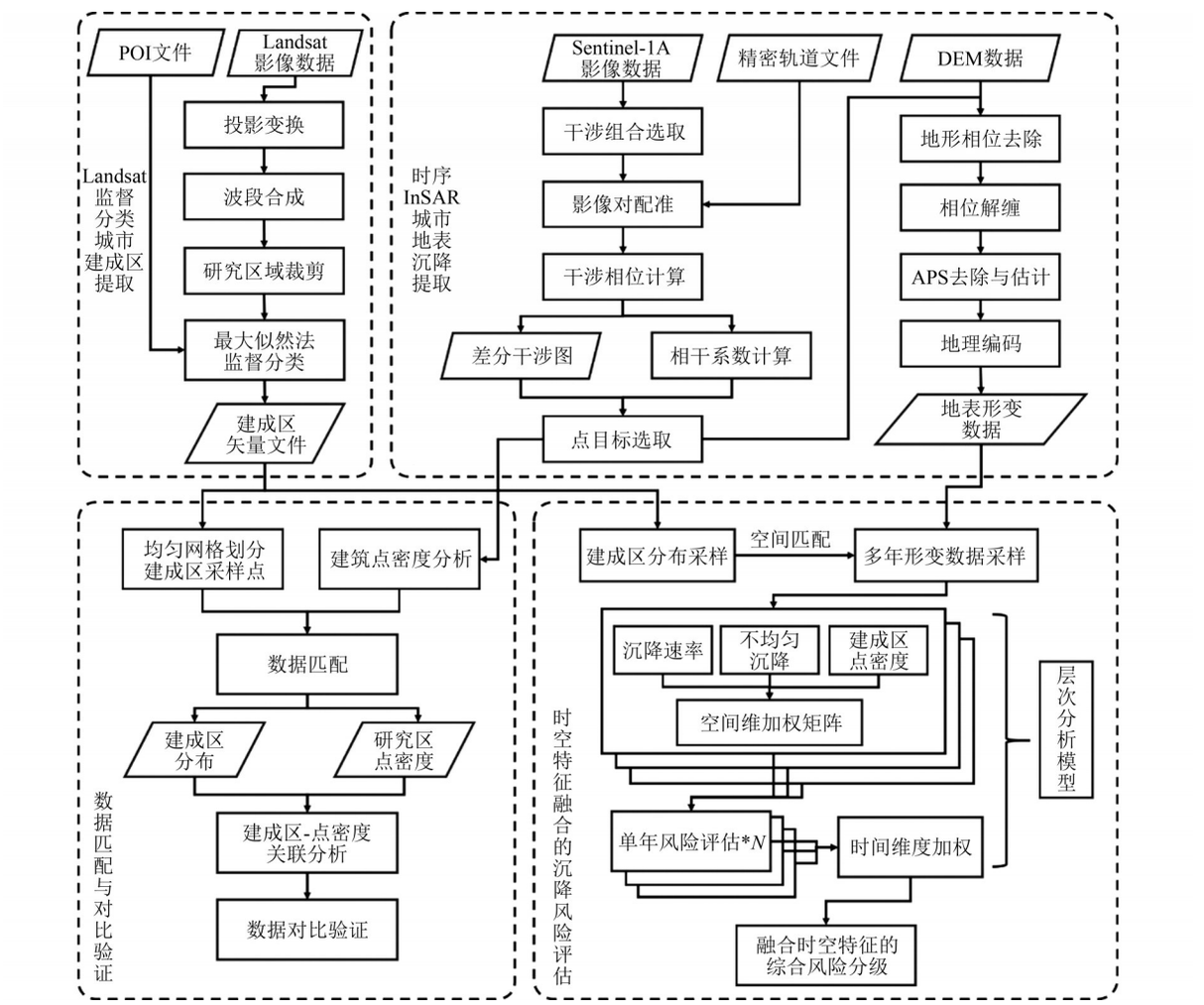
联合光学遥感城市建成区提取范围与InSAR地面沉降监测结果,可以将建成区的沉降累积变化和时空分布信息转换为建成区沉降风险指标,有效完善现有的风险评估体系。因此,众多学者也开展了时序InSAR建成区建筑沉降风险评估[28-30]。然而,当前的风险评估通常在时空尺度上较为有限,对于大范围建成区的沉降累积变化和时空分布演变等特征融合程度较低,因此风险评估精度仍然有限。

本文联合光学遥感分类和时序InSAR技术开展了广州市建成区提取与长期地面沉降风险评估研究,获取了广州市2017年、2020年、2023年的Landsat和Sentinel-1影像数据集,利用最大似然监督分类方法提取、分析广州市建成区的时空演变过程,并应用时序InSAR技术提取建成区长期地面沉降特征。在此基础上,联合建成区的沉降速率、不均匀沉降率、InSAR点密度等风险指标构建层次分析模型,深入解析建成区的多时

相沉降累积变化和点目标时空特征,提出了时空特征融合的建成区长期沉降风险评估方法。首先针对建成区沉降速率监测结果进行单年沉降风险评估,并对3年风险评估结果进行顾及时间维演化特征的加权评估,充分考虑了建成区风险的时序积累和空间演变特征,有效提高了建成区长期沉降风险评估的可靠度,实现建成区沉降风险的快速、准确评估。

1　研究方法

本文总体技术路线如图1所示。首先,应用最大似然监督分类方法[31]进行Landsat影像分类,提取城市建成区。然后采用时序InSAR技术进行Sentinel-1数据处理,监测地面沉降信息。在此基础上,对建成区提取结果和时序InSAR点目标的分布特征进行空间相关分析,验证城市建成区的提取精度。为了充分联合光学遥感建成区提取结果与InSAR沉降监测结果,本文采用均匀网格分区方法,根据建成区提取分辨率对研究区划分30 m×30 m的网格,计算每个网格子区域中心点对应的监测数据插值,用于表征各网格子区域的总体指标。最后提出了时空特征融合的城市建成区长期沉降风险评估方法,基于建成区的沉降速率、不均匀沉降率、InSAR点目标密度等风险指标构建了顾及时间维演化特征的层次分析模型,对广州市建成区的沉降风险进行量化评估。



注:DEM(digital elevation model):数字高程模型;APS(atmosphere phase screen):大气相位屏。

图1　总体技术路线图

Fig. 1　Overall Technical Flowchart

1.1　基于最大似然监督分类的城市建成区提取

本文采用最大似然监督分类方法对Landsat影像进行监督分类。最大似然分类器是根据统计原理中的极大似然估计定理提出的非线性监督式分类器,基于贝叶斯定理进行分类,是目前应用较广泛、成熟的一种监督分类方法[31]。其判别函数为:

$$g_i(x)=p(\omega_i|x)=p(x|\omega_i)p(\omega_i)/p(x) \quad (1)$$

式中,x为光谱特征向量;$p(\omega_i|x)$为x判断为ω_i的条件概率;$p(x|\omega_i)$是类别ω_i的先验概率;$p(x)$是x与类别无关情况下的出现概率。假定地物光谱特征服从正态分布,通过对数计算,判别函数可转化为:

$$g_i(x)=\ln\left[p(\omega_i)\right]-\frac{1}{2}\ln|\boldsymbol{\Sigma}_i|-\frac{1}{2}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{u}_i)^{\mathrm{T}}\sum_i^{-1}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{u}_i) \tag{2}$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_i=\begin{bmatrix}\delta_{11} & \delta_{12} & \cdots & \delta_{1m}\\ \delta_{21} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{2m}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \delta_{n1} & \delta_{n2} & \cdots & \delta_{nm}\end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\delta_{ij}=\frac{1}{N}\sum_k(x_{ik}-u_i)(x_{jk}-u_j) \tag{4}$$

式中,$\boldsymbol{\Sigma}_i$为第i类特征的协方差矩阵;$\boldsymbol{u}_i$为第i类特征的均值向量;x_{ik}表示第i类特征的第k个特征值;N为第i类特征的特征值总个数。

本文采用自行构建的兴趣点(point of interest, POI)文件作为监督分类样本,其中包括能反映各种土地利用类型的像素点位信息。为了提高建成区与其他类型土地的区分度,依据《城市用地分类与规划建设用地标准》(GB 50137—2011)和《土地利用现状分类标准》(GB/T 21010—2017)规定的城市土地分类一级标准,首先依据影像光谱特征和研究区域地形地貌将影像像素分为建成区和草地、耕地(包含园地)、林地、水域(包含水利设施用地)、未利用土地6种类型进行POI选取,根据定义,将标准第5~10类一级类用地(商服用地、工矿仓储用地、住宅用地、公共管理与公共服务用地、特殊用地、交通运输用地)等归纳为建成区区域类型。为保证监督分类精度,对每类土地类型都选取了30~200个POI,POI文件参数如表1所示。

为了检验分类效果,建成区及其他类型土地提取分类的精度评价公式为:

$$A_i=\frac{T_i}{T_i+F_i} \tag{5}$$

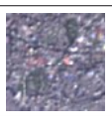
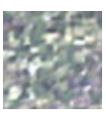
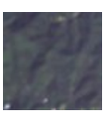
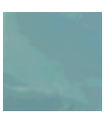
式中,A_i为第i类土地的分类精度;T_i为正确分类的图像像素数量;F_i为错误识别为其他类别的图像像素数量。

1.2 时序InSAR建成区地面沉降提取

InSAR技术通过两次重复观测的SAR卫星影像计算形变目标点在SAR视线方向产生的形变量Δr,目标形变相位ϕ_{deff}与形变量Δr、雷达波长λ之间的关系如下:

表1 POI文件参数

Table 1 POI Point File Parameters

分类类型		选点数量/个	示例
建成区		200	
非建成区	草地	30	
	耕地	50	
	林地	50	
	水域	50	
	未利用土地	30	

$$\phi_{\mathrm{deff}}=-\frac{4\pi}{\lambda}\Delta r \tag{6}$$

由于传统InSAR技术受到地形和大气扰动等因素干扰,因此文献[32]于2000年提出了永久散射体(persistent scatterer, PS) InSAR(PS-InSAR)技术,在长时序SAR数据中选择稳定具有高相干性的PS目标,通过分析这些点状目标的相位变化,将InSAR的形变监测精度提高至毫米级。

在点目标提取方面,传统PS-InSAR方法基于单一SAR振幅离差指数提取永久散射体,未考虑城市更新建设活动的干扰,可识别的点目标通常较稀疏。本文结合SAR影像的相干和非相干信息,首先将观测期内的多时相振幅稳定性和高后向散射强度作为非相干指标,选取点目标候选集;然后使用最大似然相干性γ_m作为相干指标[33],评估每个点的相位稳定性。γ_m计算如下:

$$\gamma_m=\frac{1}{N}\left|\sum_{i=1}^{N}\exp\left\{\mathrm{j}(\phi_{\mathrm{int}}-\tilde{\phi}_{\mathrm{int}}-\Delta\hat{\phi}_{\theta})\right\}\right| \tag{7}$$

式中,N为干涉图数量;ϕ_{int}为干涉相位;$\tilde{\phi}_{\mathrm{int}}$为滤波的空间相关相位;$\Delta\hat{\phi}_{\theta}$为视角误差。

基于概率分布进一步筛选点目标候选集,设定概率$p(\gamma_m)$为PS像素的概率密度$p_A(\gamma_m)$和非PS像素的概率密度$p_B(\gamma_m)$的加权,即

$$p(\gamma_m)=\alpha p_A(\gamma_m)+(1-\alpha)p_B(\gamma_m) \tag{8}$$

式中,α为$p_A(\gamma_m)$的权重。首先通过模拟随机相位的非PS像素统计其概率分布$p_B(\gamma_m)$,然后假设$p_A(\gamma_m)\approx 0$时的γ_m值β,此时$\int_0^{\beta} p(\gamma_m)\mathrm{d}\gamma_m = (1-\alpha)\int_0^{\beta} p_B(\gamma_m)\mathrm{d}\gamma_m$,接着计算出权重$\alpha$值,最后加入振幅离差$\hat{D}_{A,m}$来更准确地计算概率。$\gamma_m$与$\hat{D}_{A,m}$的关系为:

$$\frac{\left(1-\alpha(\hat{D}_{A,m})\right)\int_{\gamma^{\mathrm{thresh}}}^{1} p_B(\gamma_m)\mathrm{d}\gamma_x}{\int_{\gamma^{\mathrm{thresh}}}^{1} p(\gamma_m,\hat{D}_{A,m})\mathrm{d}\gamma_x} = q \tag{9}$$

式中,$p(\gamma_m,\hat{D}_{A,m})$为根据$\hat{D}_{A,x}$分组统计的$\gamma_m$概率分布;thresh为相干性阈值;$q$为每个分组指定的可接受假阳性率。

根据式(9),$\gamma^{\mathrm{thresh}}(\hat{D}_{A,m})$随着$\hat{D}_{A,m}$的增加而近似线性增加,即$\gamma^{\mathrm{thresh}}=\kappa\hat{D}_A$($\kappa$是常数)。通过最小二乘反演找到最佳拟合,并选择$\gamma_m>\kappa\hat{D}_{A,m}$的像素作为PS点。合并所有基于振幅和相干性选取的PS点子集,以最大化点目标的识别密度,形成最终InSAR点目标。

PS-InSAR技术考虑了地面形变、高程误差、大气干扰的影响,其中,点目标的差分干涉相位可以表示为:

$$\phi_{\mathrm{diff}}=\phi_{\mathrm{defo}}+\phi_{\mathrm{topo}}+\phi_{\mathrm{atm}}+\phi_{\mathrm{noise}} \tag{10}$$

式中,ϕ_{defo}和ϕ_{topo}分别表示雷达视线向的地面形变相位和DEM误差造成的地形相位;ϕ_{atm}和ϕ_{noise}分别代表大气和噪声相位。本文基于30 m精度的航天飞机雷达地形测绘任务DEM[34]数据和空间低通滤波[32]去除地形相位,采用文献[35-36]提出的三维解缠方法进行相位解缠,获得每个点目标的干涉相位,并基于时间高通滤波器[33]去除部分大气相位,最终解算各点目标的形变信息。

1.3　基于均匀网格点采样的数据匹配

Landsat光学影像提取的建成区结果为矢量面状要素,而InSAR地面沉降监测结果为空间分布不均匀的点状要素,两种监测结果难以直接进行联合计算与分析。

为了解决两种监测结果空间特征不匹配的问题,本文基于Landsat影像像素边界,对建成区进行30 m×30 m(即建成区提取结果分辨率)的均匀网格划分,如图2所示,并将各网格中心点作为对应子区域的采样点。在风险分析中,本文使用建成区采样点与InSAR沉降监测插值结果进行数据匹配,以匹配后各采样点的中心点位沉降数值作为对应子区域的沉降监测结果,实现建成区提取结果与沉降监测结果的联合分析,并对各子区域进行沉降风险评估。

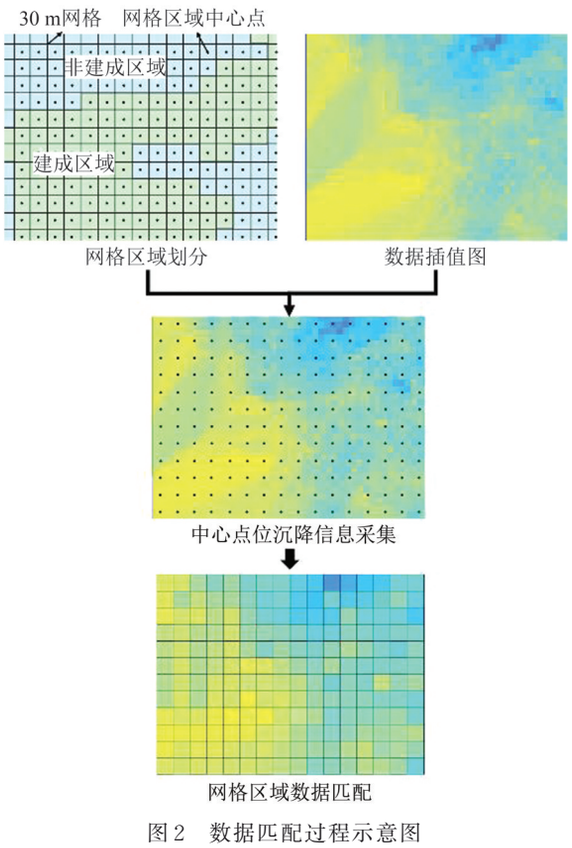


图2　数据匹配过程示意图

Fig. 2　Schematic Diagram of Data Matching Process

1.4　沉降累积变化和InSAR点目标时空特征融合的长时序沉降风险分析

传统的沉降评估方法通常基于单次监测结果进行风险评估,忽略了长时序沉降风险的变化与累积效应。为此,本文参考JGJ 125—2016《危险房屋鉴定标准》的地基变形危险状态评估条目和T/CECS 1165—2022《建筑安全星载干涉雷达监测技术规程》的风险普查数据,建立了基于建成区沉降速率、不均匀沉降速率、点目标密度等风险指标的层次分析模型。通过对单年度的沉降风险进行评估并赋予不同的权重,构建长时序总体风险评估模型,提出融合多时相沉降累积变化和点目标时空特征的城市建成区长期沉降风险分析方法,分析研究区域多年间的长期风险状态。

总体上,应用以下公式对每个区域采样点进行风险量化评分:

$$S=\sum_a\sum_b \eta_a s_{ab}\mu_b \tag{11}$$

式中,S为区域综合沉降风险评分;s_{ab}为第a年第b项评估指标的对应赋分;μ_b为第b项评估指标赋

分在单年评分中的权重;η_a为第a年的评分在总体评分中的权重。

本文联合沉降风险的易发性和易损性提出了地面沉降风险评价指标,结合经验值[37]作为基础权重,并根据实际情况规定各单年沉降风险评估指标权重,如表2和表3所示。由于沉降量和空间差异均会引发灾害,本文分别使用沉降速率与不均匀沉降率(空间单位平均年沉降量差异率)两种指标代表沉降的直接状态和空间差异,评估灾害易发性。另一方面,使用区域InSAR点密度来评估易损性,点密度越大的区域建筑分布密集复杂,容易产生更高的损害几率和更大的损失。

表2 单年沉降风险评分标准

Table 2 Detailed Rules for Rating Settlement Risk for Every Single Year

评估指标	权重(μ)	风险量级评分(s)				
		1	2	3	4	5
沉降速率/(mm·a^{-1})	0.54	[0,5]	(5,10]	(10,20]	(20,30]	>30
不均匀沉降率/%	0.25	[0,0.698] (低风险)	(0.698,1.396] (中低风险)	(1.396,2.095] (中风险)	(2.095,2.793] (中高风险)	>2.793 (高风险)
点密度/(10^{5}个·km^{-2})	0.21	[0,2]	(2,4]	(4,6]	(6,8]	>8

表3 总体沉降风险评分标准

Table 3 Detailed Rules for Rating Settlement Risk for Three Years

评分年份	总体风险评分权重
2017年	0.15
2020年	0.3
2023年	0.55

表4 总体风险分级

Table 4 Overall Risk Classification

统计项	安全(A级)	不稳定(B级)	值得关注(C级)	重点关注(D级)
总风险评分(s)	[1.0,1.5]	(1.5,2.0]	(2.0,2.5]	>2.5

根据各单年度风险评分结果,进行顾及时间维演化特征的加权评估,充分考虑了城市建成区风险的时序积累和演变特征,可有效提高城市建成区长时序沉降风险评估的可靠度。其中,由于较新年份获得的监测结果及时性较高,其风险评价与当前沉降实际情况相关性更高,因此,对较新年份赋予较高的权重,较早年份赋予较低的权重。本文选用监测周期中各年份对监测周期下一节点年份(2026年)时间间隔长短的反比(即$\eta_{2017}:\eta_{2020}:\eta_{2023}=1:3:9$)作为基础权重比,并结合实际情况对该比例进行调整,最终将2017年、2020年和2023年对应的风险评分权重分别定为0.15、0.3和0.55。

由表2和表3计算获得的综合风险评分区间为(2,4),为了直观表达区域的风险程度,参考相关城市建筑风险等级标准[29],本文基于风险量化评分结果将建成区划分为A、B、C、D 4个等级,分别代表安全、不稳定、值得关注和重点关注的区域,如表4所示,实现城市建成区的风险分级划分。

2 研究区与数据源

2.1 研究区

广州市下辖11个区,总面积7 434.40 km^2。2024年,广州市规划和自然资源局发布《广州面向2049的城市发展战略规划》[38],明确了广州市各区域的城市发展定位和未来发展规划,如图3所示,南沙区将作为广州市"南拓"方针的主要发展区域,黄埔、增城为"东进"方针的对应区域,而广州核心老城区(越秀、荔湾、天河和海珠4区)将以老城提质改造为主要发展目标。

2.2 数据源

本文采用的数据包括Landsat光学卫星影像和Sentinel-1雷达卫星影像,其数据覆盖范围分别如图3中的黄色和红色矩形所示,白色边界表示广州市各区的空间范围。

为了保证较高的建成区提取精度,本文从地理空间数据云平台(https://www.gscloud.cn)筛选了云量小于1%的Landsat遥感图像。经过筛选,选用了分别获取于2017年、2020年的Landsat 8和2023年的Landsat 9数据,具体参数如表5所示。参数和数据获取时间如表6和表7所示。此外,还使用了30 m精度的NASA DEM和Sentinel-1卫星轨道精密数据等辅助数据。

3 研究结果

3.1 广州市Landsat影像建成区提取结果

本文提取了广州市2017年、2020年和2023年的城市建成区范围(图4),精度达到约91%,见表8。

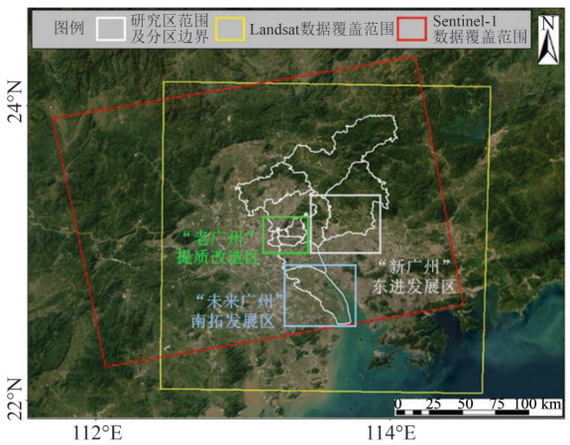


图 3　研究区概况和数据覆盖情况图

Fig. 3　Overview of the Study Area and Data Coverage Map

表 5　Landsat 数据参数

Table 5　Landsat Data Parameters

年份	卫星名称	数据类型	条带号	获取时间	平均云量/%
2017	Landsat 8	OLI_TIRS	122	2017-10-23	0.05
2020	Landsat 8	OLI_TIRS	122	2020-02-18	0.05
2023	Landsat 9	OLI_TIRS	122	2023-03-06	0.71

表 6　Sentinel-1 数据参数

Table 6　Sentinel-1 Data Parameters

参数名称	参数值
轨道方向	升轨
分辨率/(m×m)	5×20
时间周期/d	12
成像模式	干涉宽幅
波段类型	C 波段
波段波长/cm	5.6
极化方式	VV+VH

广州市全域及各二级行政区建成区的面积与所占比例见表 9。其中,广州市 2017 年、2020 年和 2023 年的建成区面积分别约为 1 589、1 620 和 1 699 km^2,在 2017—2020 年、2020—2023 年分别增长约 1.9%、4.8%。总体上,从 2017—2023 年,广州市建成区格局变化不大,只在南沙区部分区域(如图 4 中黑色方框区域)存在持续变化。

3.2　广州市 InSAR 沉降监测结果

为了保证 InSAR 结果的精度,本文选取了广州国际金融城的水准点提供参考和验证,水准点分布位置和其沉降时序如图 5 所示。其中,由于水准点 1 沉降量轻微,因此本文在 InSAR 处理过程中选用水准点 1 点位作为稳定参考点。在此基础上,根据空间最近原则选取同结构中距离各水准点最近的

表 7　Sentienl-1 卫星数据获取时间表

Table 7　Sentinel-1 Data Acquisition Schedule

数据集	数据获取时间
2017 年数据集	2017-03-12、2017-03-24、2017-04-05、2017-04-17、2017-04-29、2017-05-11、2017-05-23、2017-06-04、2017-06-28、2017-07-10、2017-07-22、2017-08-03、2017-08-15、2017-08-27、2017-09-08、2017-09-20、2017-10-02、2017-10-14、2017-10-26、2017-11-07、2017-11-19、2017-12-01、2017-12-13、2017-12-25
2020 年数据集	2020-03-08、2020-03-20、2020-04-01、2020-04-13、2020-04-25、2020-05-07、2020-05-31、2020-06-12、2020-06-24、2020-07-06、2020-07-18、2020-07-30、2020-08-11、2020-08-23、2020-09-04、2020-09-16、2020-09-28、2020-10-10、2020-10-22、2020-11-03、2020-11-15、2020-11-27、2020-12-09、2020-12-21
2023 年数据集	2023-03-17、2023-04-10、2023-04-22、2023-05-04、2023-06-09、2023-06-21、2023-07-03、2023-07-15、2023-08-08、2023-08-20、2023-09-01、2023-09-13、2023-09-25、2023-10-07、2023-10-19、2023-10-31、2023-11-12、2023-11-24、2023-12-06、2023-12-18、2023-12-30

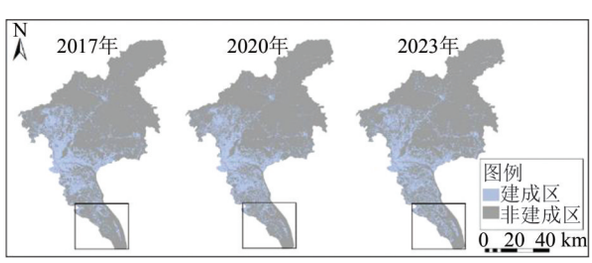


图 4　建成区提取结果

Fig. 4　Extraction Results of Built-Up Areas

表 8　分类精度评估结果

Table 8　Accuracy Evaluation of Classification

年份	建成区	水域	耕地	草地	林地	未利用土地
2017	0.92	0.99	0.85	0.80	0.96	0.28
2020	0.93	0.99	0.94	0.73	0.96	0.26
2023	0.91	0.98	0.91	0.73	0.95	0.35

InSAR 点目标进行沉降时序对比验证,如图 5(b)~5(d)所示。经对比,时序 InSAR 获取的沉降时序结果在趋势上与水准点十分接近,相差均不超过 2 mm;由于选取的各 InSAR 点与水准点并非完全对应,导致二者的监测结果在沉降数值上存在较小的差异(小于 2 mm),但整体沉降趋势都保持较好的一致性,证明了本文 InSAR 结果的可靠性。

广州市 2017 年、2020 年和 2023 年的地面沉降监测结果如图 6 所示,其中红色与蓝色线分别为 −15 mm/a 和 15 mm/a 的等值线。如图 6(a)所示,在 2017 年,南沙区南部(*A*1 区域)发生了大范围沉降,其中,南部形变速率最高可达到 −67

mm/a,该区域主要为万顷沙冲积、海积平原和滩涂区域,地面沉降主要受软土固结沉降影响;核心老城区到番禺区一带的$A2$区域表现为轻微抬升,平均约7 mm/a,主要位于水资源丰富的番禺区,抬升可能受地下水位变化影响;横跨白云区西部、花都区东部和从化区西部的$A3$区域平均沉降速率约-5 mm/a,最大约达-20 mm/a,该区域为流溪河冲积平原,土质较松软,易发生沉降;从化东部到增城北部的$A4$区域存在较大面积的抬升与下沉,主要以山区为主,形变主要受山体地质活动影响。

在2020年,$A1$区域对应的南沙区原沉降中心面积大幅减小,沉降速率减小至平均-5 mm/a,原$A2$和$A3$区域的沉降中心也得到减缓;增城区到从化一带出现了较大规模抬升,如图6(b)中$B1$所示,平均约达10 mm/a,主要受山体地质活动影响;从化北部的多个沉降中心仍然存在,抬升区域逐渐减小。

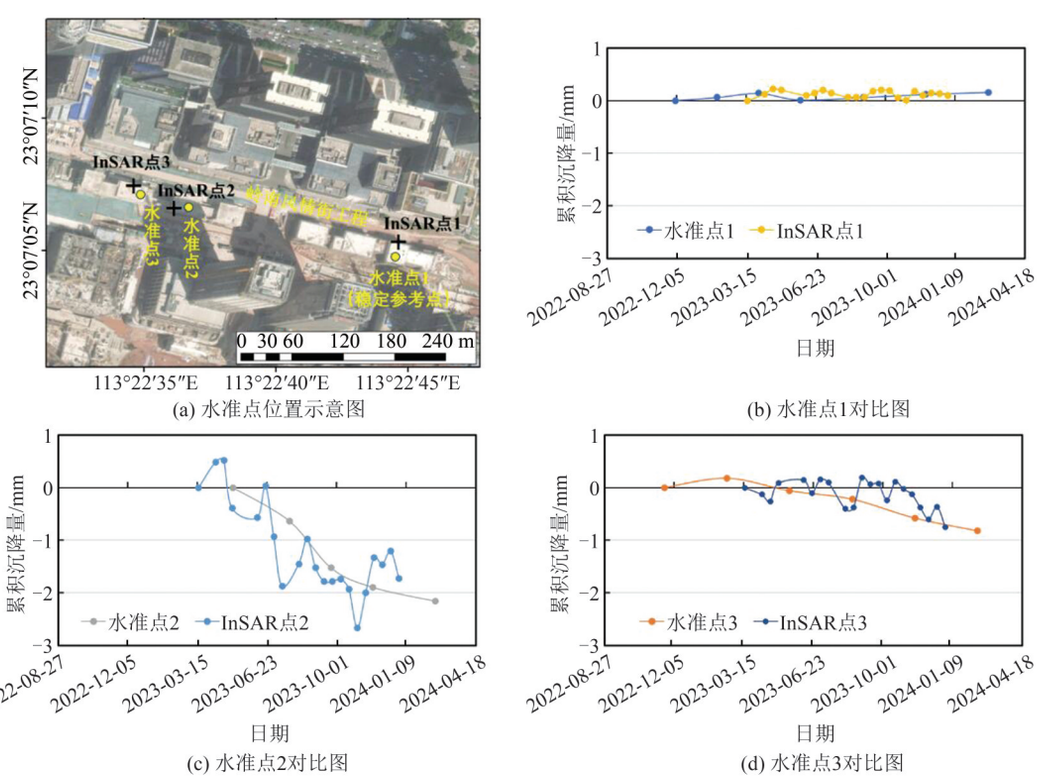
在2023年,沉降格局整体上与2017年相似,$C1$~$C4$与$A1$~$A4$区域均有对应关系,其中南沙区南部的万顷沙和龙穴片区($C1$)下沉趋势相对2020年加重,最大约达-32 mm/a;南沙北部到番禺一带的$C2$区域,抬升面积比2017年($A2$)有明显扩大,平均约8 mm/a;以白云区为中心的$C3$区域出现较大规模沉降,最大约达-24 mm/a,位置较$A3$区域有南移,转移至九连山余脉一带,受地质活动影响较大;从化北部($C4$)区域分布与2017年相似。

表9 广州市建成区提取结果统计

Table 9 Statistics on the Extraction Results of Built-Up Areas in Guangzhou

区域	建成区面积/km²			建成区比例/%		
	2017年	2020年	2023年	2017年	2020年	2023年
荔湾区	55.25	55.81	53.06	93.50	94.44	89.79
越秀区	28.17	28.27	27.64	83.32	83.65	81.77
天河区	83.70	80.51	73.12	86.90	83.57	75.90
海珠区	64.48	66.17	60.65	71.34	73.20	67.08
南沙区	179.07	211.67	258.79	33.94	40.12	49.05
白云区	292.72	283.34	278.14	36.78	35.60	34.95
番禺区	244.41	282.18	245.69	31.09	35.89	31.25
黄埔区	128.67	124.07	130.96	26.57	25.62	27.05
花都区	262.54	242.13	238.38	27.07	24.96	24.57
增城区	173.29	174.51	225.10	10.72	10.80	13.93
从化区	76.78	72.02	107.53	3.89	3.65	5.45
全域	1 589.08	1 620.68	1 699.04	21.37	21.80	22.86

注:各二级行政区排序以2023年建成区比例降序排序。



(a) 水准点位置示意图

(b) 水准点1对比图

(c) 水准点2对比图

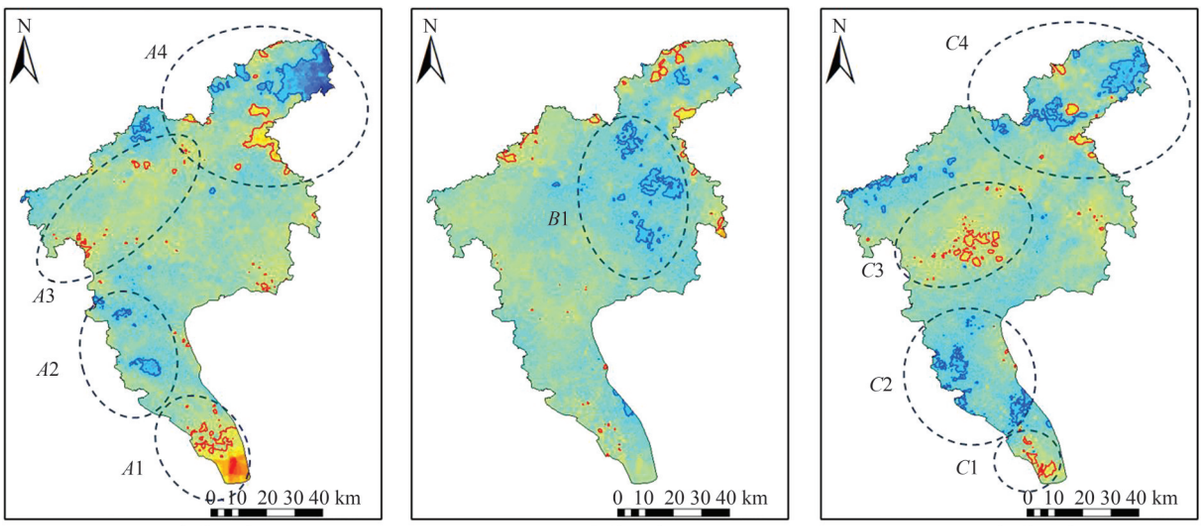
(d) 水准点3对比图

图5 InSAR结果精度验证图

Fig. 5 InSAR Result Accuracy Verification Chart

3.3 建成区提取与沉降监测结果对比验证

InSAR点目标位置可以反映建成区分布,建筑越密集、后向散射更强的建成区,点目标数量和密度越大,而植被覆盖率越大、建筑物越少的



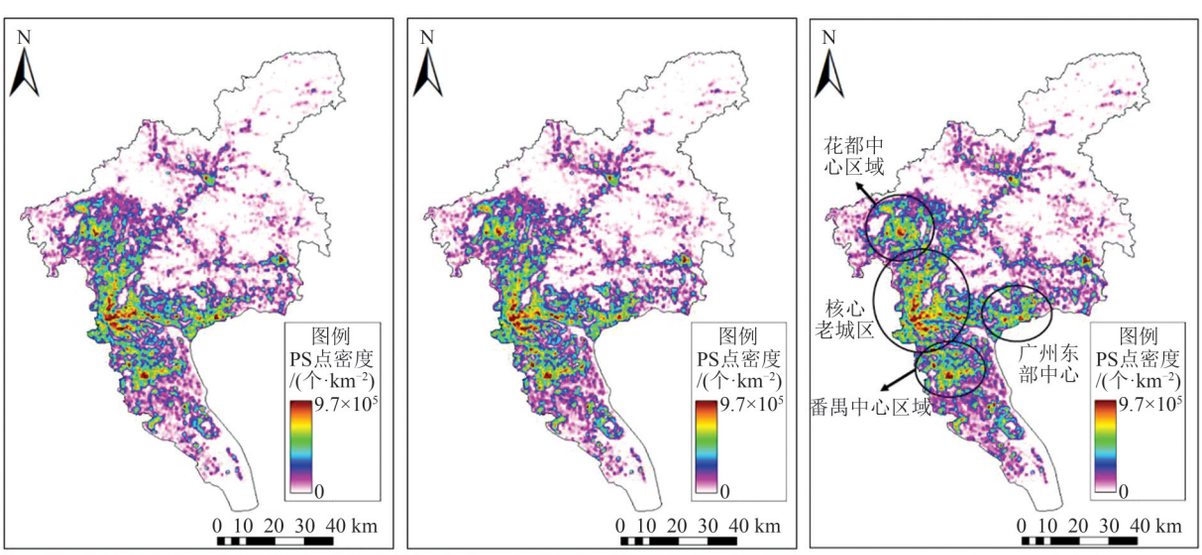
(a) 2017年监测结果　(b) 2020年监测结果　(c) 2023年监测结果

图 6　广州市全域沉降速率图

Fig. 6　Global Settlement Rate Map of Guangzhou City

区域,点目标越稀少。因此,将 InSAR 点目标分布与建成区提取结果进行空间匹配分析,可以验证本文研究结果的可靠性。

本文在 2017 年、2020 年和 2023 年提取的建成区点目标数量分别约为 5 132 190 个、5 078 918 个和 5 324 250 个,分别占点目标数量的 80.499%、75.709%、72.763%,各年度 InSAR 点密度分布见图 7,广州市点密度高于 3×10^5(图中蓝到红色)的区域与图 5 中提取的建成区范围基本契合,其中多个点密度热点区域(图 7(c)中黑框区域)分别对应广州核心城区、番禺中心、花都中心和增城中心等多处早期建成区,而南沙区虽整体密度水平较低,但点密度逐渐提高。



(a) 2017年InSAR点密度　(b) 2020年InSAR点密度　(c) 2023年InSAR点密度

图 7　2017 年、2020 年、2023 年 InSAR 点密度图

Fig. 7　InSAR Point Density Maps in 2017, 2020 and 2023

对全市点密度数据进行采样,计算所有网格区域的点密度分布直方图和各点密度统计区间的建成区比例,如图 8 所示。3 年中,广州市有超过约 80% 的区域点密度低于 2×10^5 个/km^2,随着点密度的增加,区域内的建成区比例明显增加。当点密度分别高于 3×10^5 个/km^2 和 5×10^5 个/km^2 时(图 8 区域①和②),建成区的比例分别超过 60% 和 90%。由于点密度越高,统计区域基数逐渐减小,且一些非建成区也存在点目标高密度区域(如高后向散射的临时设施等),

导致图中极高密度区域的建成区比例有小幅下降,但仍能说明建成区空间分布与InSAR点密度大于3×10^5个/km^2的区域分布基本一致,相互验证了研究结果的可靠性。

4 讨 论

4.1 建成区时空演变分析

本文统计了2017—2020年和2020—2023年广州各区的新增(由非建成区转为建成区)与流失(由建成区转为非建成区)两类区域面积,并结合建成区的点密度进行城市演变分析,如图9和图10所示。其中,InSAR点密度在一定程度上反映了区域发展情况,如建筑扩建和增密等,新建筑的出现导致区域点目标密度提高,而新建成区的施工和老建成区的更新改造会导致点密度下降。

首先,核心老城四区(越秀、天河、荔湾和海珠)的建成率最高,且呈现小幅提升,其InSAR点密度也最高,接近或超过40 000个/km^2(越秀区最高,达到50 000个/km^2)。根据广州市2024年重点建设项目计划[39],该四区城市更新项目占全市约32%,建筑密度居全市前列。可以推测,该四区由于建成区范围接近容量极限,无法大规模扩张,主要通过扩建、改造等活动使得建筑密度小幅度提高,这与广州城市建设规划中的"老城提质"方针十分契合。

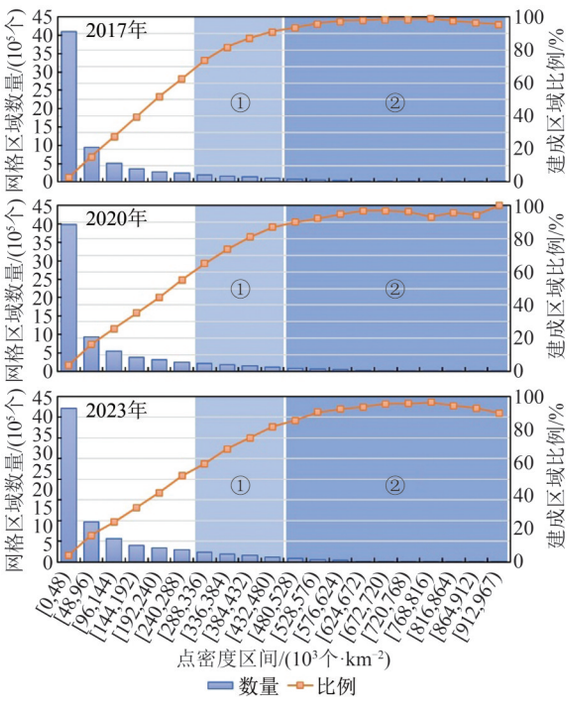
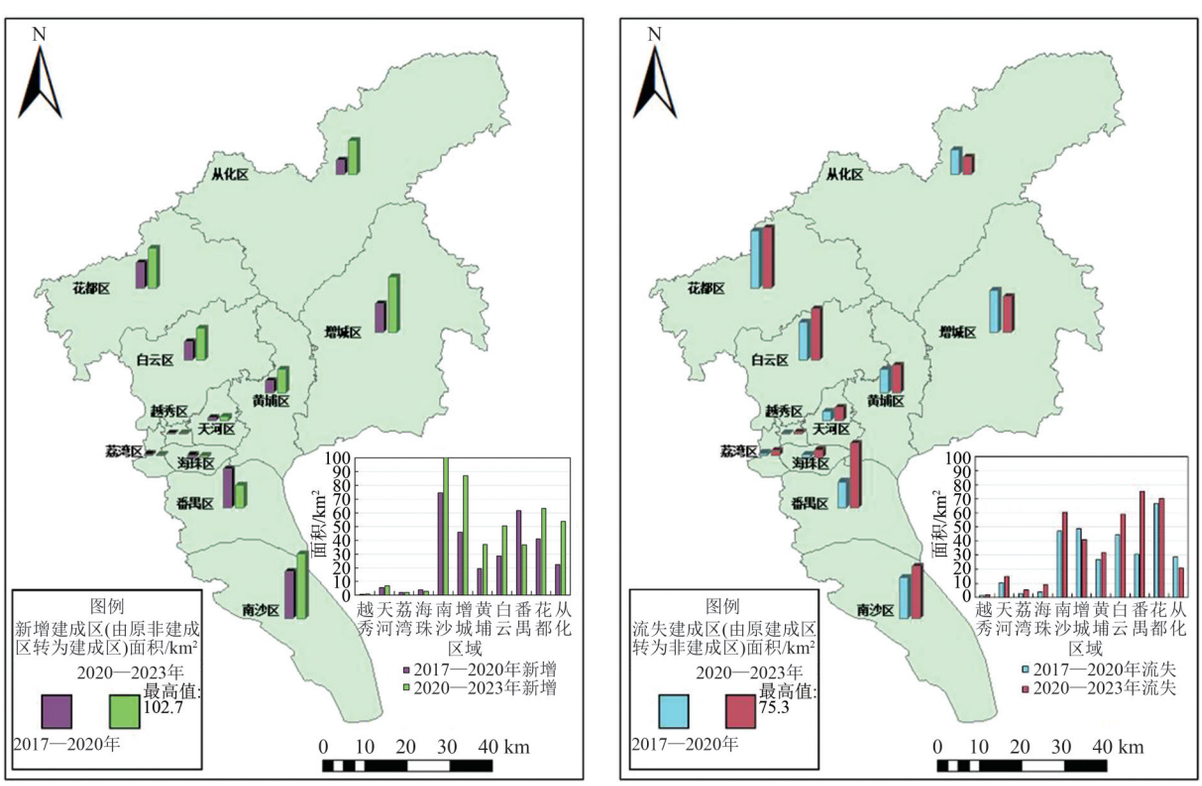


图8 2017年、2020年和2023年广州网格区域InSAR点密度采样结果直方图及建成区分布比例图

Fig. 8 Histograms of InSAR Point Density Sampling Results and Distribution Ratio Map of Built-Up Areas in Guangzhou Grid Areas in 2017, 2020 and 2023



(a) 新增建成区(非建成区转为建成区)面积统计 (b) 流失建成区(建成区转为非建成区)面积统计

图9 建成区域-非建成区域转移面积统计

Fig. 9 Statistics of Transfer Area Between Built-Up and Non Built-Up Areas

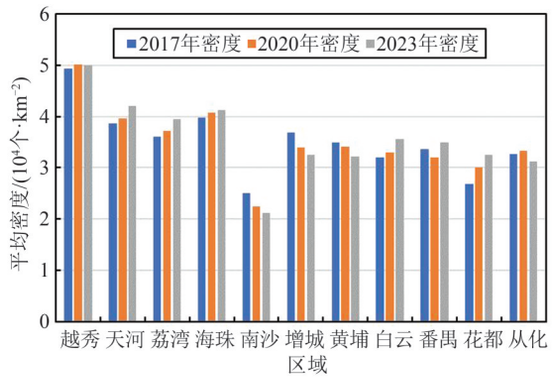


图 10　建成区 InSAR 点目标密度变化统计

Fig. 10　Statistics of InSAR Point Density Changes in Built-Up Areas

城市建设重点发展的南沙、增城和黄埔三区建成区扩张较明显。其中,南沙、增城两区新增建成区规模最高且持续增长,最大建成区新增面积达到约 174 km²;黄埔区的新建成区虽然面积较小,但后期也出现了较大比例扩张。尽管建成区面积有所增加,但受到大规模城市建设影响,该三区的平均点密度略有下降。广州市 2024 年重点建设项目计划中[38],三区中诸如南沙国际港航中心、广州东部(增城)交通枢纽中心、广州交通大学(黄埔)等重点建设项目占全市约 39.4% 以上,其中城市更新项目 34 项,可见该三区正在经历大规模建设与改造活动,这与广州城市建设规划中"两洋南拓、两江东进"的发展方针高度契合。

白云、番禺、花都虽然都有逐渐增大的新增建成区规模,但少数区域也同时存在较大的建成区流失量,总体来看,其点密度变化呈现持续提高趋势。广州市 2024 年重点建设项目计划中[38],该三区入列项目 142 项以上,包括广州北站(花都)项目、临空经济产业园区续建项目(白云)、狮子洋未来产业科技园项目(番禺)等。该三区虽不是广州城市发展的最重点区域,但仍有较大规模的城市建设和更新改造,规模小于南沙、增城和黄埔三区。

从化区也在后 4 年加速了新建成区建设,其建成区 InSAR 点目标密度先升后降,可以推测该区在前 4 年以改造为主,后期以新建为主,但可能受限于自身定位与地区条件,其建成区发展的总体规模较小。

4.2　建成区沉降风险分析

4.2.1　显著沉降区域

广州市 2017 年、2020 年和 2023 年度的建成区沉降速率分布如图 11 所示,南沙区与白云区在 2017—2023 年间发展速度较快,沉降区域面积最大。其中,南沙区南部沉降范围较大,平均约 −15 mm/a,最高可达 −67 mm/a,该区域主要为万顷沙及龙穴片区的冲积平原和滩涂区域,地面沉降主要受软土施工开挖和固结沉降影响;白云区也出现较大规模沉降,最大可达约 −24 mm/a,该区域为流溪河冲积平原,土质较松软,受到施工建设影响易发生沉降。

广州市 2017 年、2020 年和 2023 年度的建成区沉降速率统计结果如表 10 所示,可以看出,2017 年、2020 年和 2023 年各有约 1.74%、0.21% 和 0.78% 的建成区处于显著沉降状态(沉降速率≥ −15 mm/a),即显著沉降区域在 2017—2020 年有较大范围减少,在 2020—2023 年又有增加,总体上,处于显著沉降状态的采样点数量与比例都有减少。

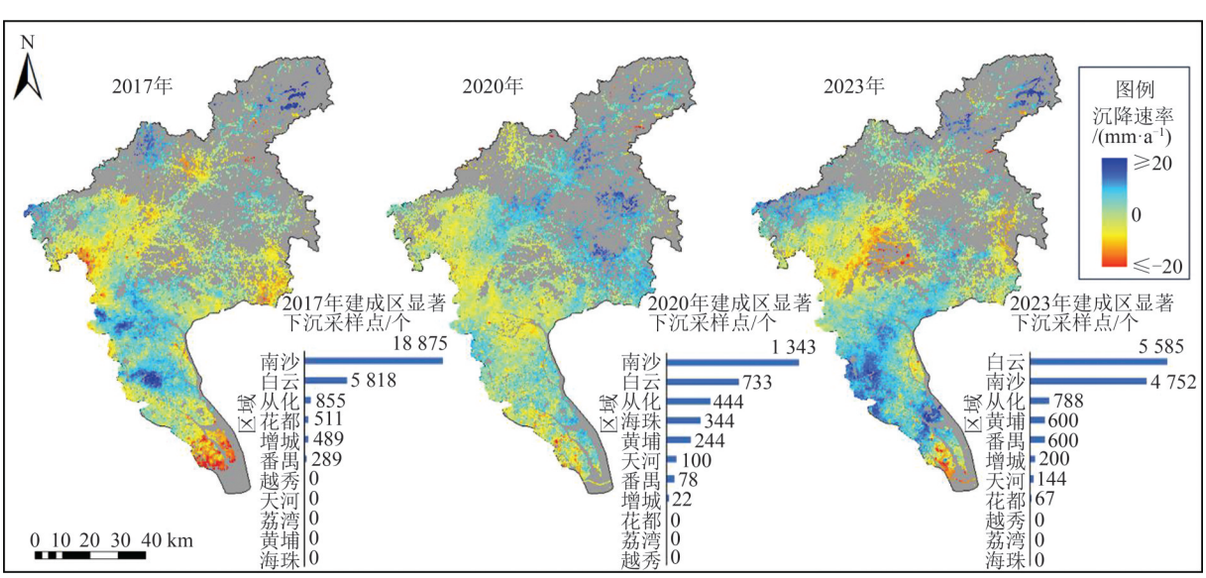


图 11　建成区沉降速率分布与数据统计图

Fig. 11　Distribution and Data Statistics of Settlement Rate in Built-Up Areas

表10 显著沉降状态区域比例统计

Table 10 Statistics on the Proportion of Areas with Significant Settlement Status

区域	建成区显著下沉区域比例/%			建成区显著下沉区域平均沉降速率/(mm·a^{-1})		
	2017年	2020年	2023年	2017年	2020年	2023年
白云	2.03	0.26	2.05	−17.36	−17.42	−17.84
从化	1.14	0.63	0.75	−21.27	−21.45	−19.25
番禺	0.12	0.03	0.25	−20.06	−16.42	−18.31
海珠	0.00	0.53	0.00	—	−21.29	—
花都	0.20	0.00	0.03	−16.65	−16.45	−26.45
黄埔	0.00	0.20	0.47	—	−15.92	−19.32
荔湾	0.00	0.00	0.00	—	—	—
南沙	10.80	0.65	1.91	−23.93	−18.62	−19.32
天河	0.00	0.13	0.20	—	−16.36	−15.10
越秀	0.00	0.00	0.00	—	—	—
增城	0.29	0.01	0.10	−18.88	−21.18	−18.97
总计	1.74	0.21	0.78	−22.93	−19.08	−18.60

4.2.2 不均匀沉降区域

形变速率差异大的区域可能引发地面裂缝、房屋倒塌等灾害,因此,建成区的不均匀沉降风险分析十分必要。参考已有研究的不均匀沉降指标[40-41],本文应用插值分析获取建成区的沉降差异信息,并依据不均匀沉降率划分5个风险等级(如表2所示),定义不均匀沉降出现的概率,获得建成区不均匀沉降风险图,如图12所示。南沙区的中高级及以上不均匀沉降风险区域面积较大,主要分布于南沙万顷沙、龙穴地区,地物类型以居民自建房为主。白云、番禺区次之,可能由局部建设活动等原因引起。此外,从化中心城区也有部分区域呈现较显著的不均匀沉降风险。

广州市各行政区的不均匀沉降风险统计结果如表11所示。总体上,2017年、2020年和2023年各有0.39%、0.33%和0.66%的建成区不均匀沉降风险为中风险及以上,不均匀沉降风险在后4年有一定提升,其中,中风险及以上区域比例提高了约1倍。在空间分布上,与图11中所示一致,南沙区的中风险及以上不均匀沉降风险区域占比最大。

4.3 建成区长时序风险等级评价

基于本文提出的建成区长时序风险评估方法,先对广州市2017年、2020年和2023年建成区进行单年度风险评分,结果如图13(a)~13(c)所示,风险评分越高,代表风险程度更高。可以发现,2017年南沙区南部和从化区东北部存在大量区域风险评分高于3;2020年广州市总体沉降风险最小,风险较高的区域主要位于广州东北部,鲜有评分高于3的区域;2023年的风险分布与2017年类似,南沙区的高风险区域有所提升。总体上,2017—2023年广州市建成区沉降风险分布变化较大,单年的沉降风险难以代表长期沉降风险,因此,需要综合3次单年度风险评分结果,才能更全面地评估建成区的实际沉降风险。

根据各单年度的风险评分结果构建层次分析模型,对沉降速率、不均匀沉降率和InSAR点目标密度等风险指标赋予不同的权重(如表2所示),并根据式(11)计算广州市建成区2017—2023年的综合风险评分。综合风险评分区间为(2,4),本文将评分区间分为4级,分别对应安全(A级)、不稳定(B级)、值得关注(C级)和重点

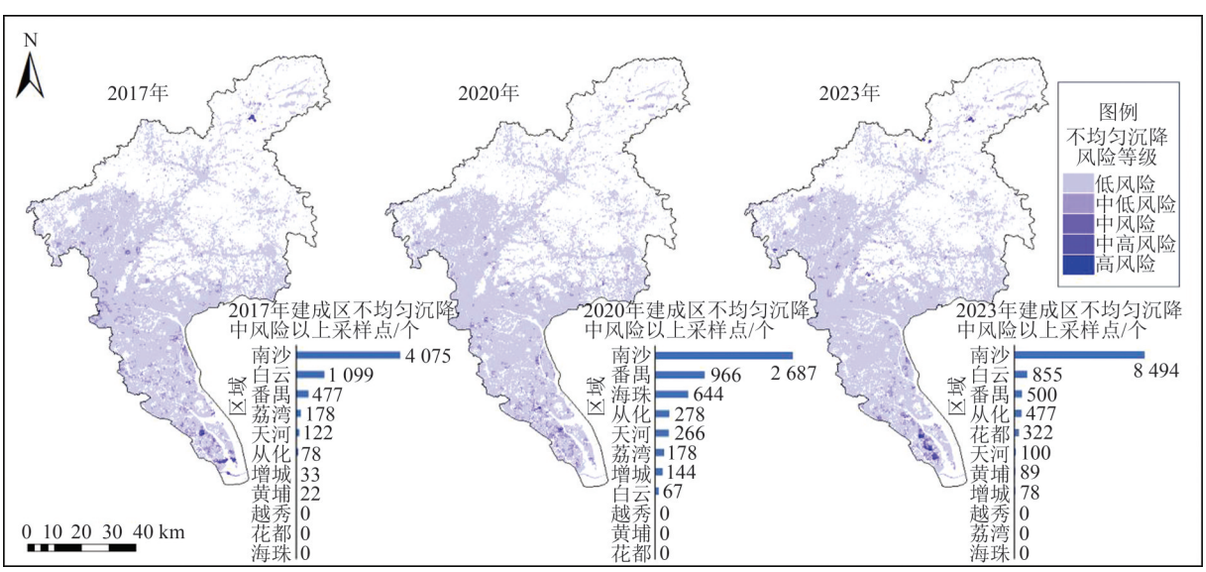


图12 建成区不均匀沉降风险分布与统计图

Fig. 12 Distribution and Statistical Chart of Uneven Settlement Risk in Built-Up Areas

表 11　建成区不均匀沉降中风险以上区域比例统计/%

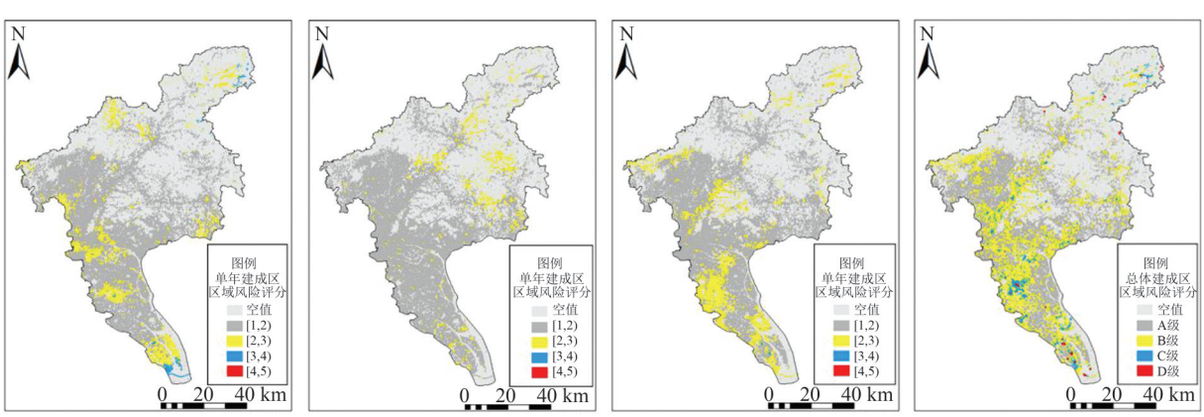
Table 11　Statistics on the Proportion of Medium and High-Risk Areas with Uneven Settlementin Built-Up Areas/%

区域	2017年	2020年	2023年
白云	0.39	0.02	0.32
从化	0.10	0.39	0.45
番禺	0.20	0.35	0.21
海珠	0.00	0.99	0.00
花都	0.00	0.00	0.13
黄埔	0.02	0.00	0.07
荔湾	0.33	0.32	0.00
南沙	2.33	1.30	3.36
天河	0.15	0.34	0.14
越秀	0.00	0.00	0.00
增城	0.02	0.09	0.04
总计	0.39	0.33	0.66

关注(D级)4种风险等级,得到广州市建成区风险等级分布情况如图13(d)所示。

由图13(d)可知,广州市大部分建成区都处于不稳定(B级)和安全(A级)状态,表明建成区在2017—2023年间总体风险较低;沉降风险在C级以上需要关注的区域主要位于南沙区和白云区。统计广州市各行政区的建成区风险情况,如表12所示,其中安全区域(A级)占比约80.70%,不稳定区域(B级)占比约17.61%,由此可见,广州市建成区的较低风险区域占比超过90%。而值得关注的区域(C级)占比约1.61%,需要重点关注的区域(D级)占比约0.08%。其中,白云区和南沙区C级以上区域占比显著高于其他区域,分别超过6%和3%,且南沙区的D级风险区域占比最高。

为了验证风险评估结果,本文探寻了南沙和白云高风险区域的地面沉降事件,其中,被判断为C级以上的区域中,有南沙龙光棕榈水岸、南沙大道、白云三元里街和白云金碧新城等地都曾被报道过沉降事件,如图14所示,与沉降风险评估结果一致。因此,本研究能够有效评估城市建成区的长期沉降风险,综合多年沉降监测结果,预警因长期地面沉降导致的建成区灾害,并帮助城市管理者预先处置高风险区域,为城市突发灾害应急提供支撑,降低灾害发生几率。



(a) 2017年风险评分　(b) 2020年风险评分　(c) 2023年风险评分　(d) 总体风险评级

图13　广州市建成区沉降风险等级分布

Fig. 13　Distribution of Settlement Risk Levels in Built-Up Areas of Guangzhou

5　结　语

本文基于Landsat和Sentinel-1卫星影像,利用最大似然监督分类方法和时序InSAR技术,分别提取了广州市2017年、2020年和2023年的城市建成区范围,并开展了地面沉降监测。首先对提取的建成区和InSAR点密度分布进行空间匹配分析,获得了广州市城市发展特征,并分析了广州市建成区的地面沉降演变过程。在此基础上,建立了基于建成区沉降速率、不均匀沉降率、建筑点密度等风险指标的层次分析模型,并提出了融合多时相沉降累积变化和InSAR点目标时空特征的城市建成区长时序沉降风险分析方法,对广州市建成区进行沉降风险等级划分。主要结论如下:

1)基于Landsat数据与最大似然监督分类方法,实现了广州市大范围建成区的精准、快速提取,提取精度达91%以上。分析了广州市建成区的时空演变特征,与广州市城建规划的发展趋势十分契合,同时,InSAR点密度分布和建成区的空间分布具有高度一致性,证明了本文建成区提取结果的可靠性。

2)2017—2023年,全市严重沉降区域主要分布于南沙、白云等区,其中,核心老城区城市建设规模

表12 广州市建成区风险分级情况统计

Table 12 Statistics on Risk Classification of Built-Up Areas in Guangzhou

区域	安全(A级)	不稳定(B级)	值得关注(C级)	重点关注(D级)	C级以上区域比例/%
白云	121 898	133 692	16 973	12	6.23
从化	94 151	10 936	918	46	0.91
番禺	222 528	17 600	105	0	0.04
海珠	44 243	14 779	0	0	0.00
花都	212 288	21 222	534	0	0.23
黄埔	119 250	8 753	417	36	0.35
荔湾	44 464	7 523	105	0	0.20
南沙	220 134	24 462	6 977	1 161	3.22
天河	54 853	16 403	0	0	0.00
越秀	14 546	11 923	557	0	2.06
增城	193 875	25 633	186	46	0.11
总计	1 342 230	292 926	26 772	1 301	1.69



图14 沉降实例调查结果

Fig. 14 Settlement Case Investigation Results

较低,地表较为稳定;发展热点区域中,南沙区的城市建设规模最高,加之广泛分布软弱土层,其建成区内沉降最严重;白云区位于沉积平原,城市建设规模和严重沉降区域较大;从化区多为山地,虽建设规模较小,但受地质活动影响严重,沉降也较显著。综合2017年、2020年、2023年3年监测结果,南沙区和白云区面临着最高的长期沉降风险,威胁这些区域的未来城市快速发展,未来要着重加强对南沙、白云等重点发展区域的沉降监测与防治工作,保证城市的高效、安全发展。

3)提出了融合多时相沉降累积变化和InSAR点目标时空特征的城市建成区长期沉降风险分析方法,其中,风险评级的权重充分考虑了多次监测数据的时间分布和不同建成区的空间发展特征,实现了广州市大范围建成区的沉降风险评估,并将广州近年来的沉降事件与本文建成区沉降风险评估结果进行对比,发现二者具有较高的一致性,证实了风险评估结果的可靠性。

参 考 文 献

[1] 刘毅. 地面沉降研究的新进展与面临的新问题[J]. 地学前缘, 2001, 8(2): 273-278.
LIU Yi. Land Subsidence Research Approaches and Advent Problems [J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(2): 273-278.

[2] AO Z R, HU X M, TAO S L, et al. A National-Scale Assessment of Land Subsidence in China's Major Cities[J]. *Science*, 2024, 384(6693): 301-306.

[3] 蒲川豪, 许强, 蒋亚楠, 等. 延安新区地面沉降分布及影响因素的时序InSAR监测分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1728-1738.
PU Chuanhao, XU Qiang, JIANG Yanan, et al. Analysis of Land Subsidence Distribution and Influencing Factors in Yan'an New District Based on Time Series InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1728-1738.

[4] ZHANG H X, ZENG R Q, ZHANG Y, et al. Subsidence Monitoring and Influencing Factor Analysis of Mountain Excavation and Valley Infilling on the Chinese Loess Plateau: A Case Study of Yan'an New District[J]. *Engineering Geology*, 2022, 297: 106482.

[5] 厉飞, 闫庆武, 邹雅婧, 等. 利用夜间灯光POI的城市建成区提取精度研究——以珞珈一号01星和NPP/VIIRS夜间灯光影像为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(6): 825-835.
LI Fei, YAN Qingwu, ZOU Yajing, et al. Extraction Accuracy of Urban Built-Up Area Based on Nighttime Light Data and POI: A Case Study of Luojia 1-01 and NPP/VIIRS Nighttime Light Images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(6): 825-835.

[6] 王厚望. 城市不透水面遥感信息提取精度对比研究[J]. 测绘技术装备, 2024, 26(1): 145-149.
WANG Houwang. Comparison of the Extraction Accuracy of Urban Impervious Surfaces Information Based on Remote Sensing[J]. *Geomatics Technology and Equipment*, 2024, 26(1): 145-149.

[7] 王若曦, 李建, 李熙, 等. DMSP夜间灯光数据与Landsat数据结合的建成区提取研究: 以江西省为例[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2018, 52(1): 130-136.
WANG Ruoxi, LI Jian, LI Xi, et al. Extraction of Built-Up Areas Using Combination of Landsat and DMSP Data—A Case Study of Jiangxi Province[J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2018, 52(1): 130-136.

[8] 李德仁, 罗晖, 邵振峰. 遥感技术在不透水层提取中的应用与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版),

2016, 41(5): 569-577.
LI Deren, LUO Hui, SHAO Zhenfeng. Review of Impervious Surface Mapping Using Remote Sensing Technology and Its Application[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(5): 569-577.

[9] 黄璐, 杨英宝, 朱琴. 基于DMSP/OLS数据的南京市建成区扩展研究[J]. 地理空间信息, 2018, 16(1): 94-97.
HUANG Lu, YANG Yingbao, ZHU Qin. Expansion Research on the Build up Area in Nanjing City Based on DMSP/OLS Data[J]. *Geospatial Information*, 2018, 16(1): 94-97.

[10] SHI K F, HUANG C, YU B L, et al. Evaluation of NPP-VIIRS Night-Time Light Composite Data for Extracting Built-Up Urban Areas[J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(4): 358-366.

[11] 程朋根,吴雷云,张培林. 多源数据支持下的南昌市城市发展与生态耦合关系分析[J]. 测绘地理信息, 2023,48(2):107-112.
CHENG Penggen, WU Leiyun, ZHANG Peilin. Research on the Coupling Relationship Between Urbanization and Ecological Environment of Nanchang City Based on Multi-source Data[J]. *Journal of Geomatics*, 2023,48(2):107-112.

[12] 刘权毅, 詹庆明, 李建松, 等. 珞珈一号夜间灯光影像在建设用地提取中的应用: 以武汉市为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(1): 30-39.
LIU Quanyi, ZHAN Qingming, LI Jiansong, et al. Extracting Built-Up Areas Using Luojia-1A Nighttime Light Imageries in Wuhan, China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(1): 30-39.

[13] ZHANG J, YUAN X D, LIN H. The Extraction of Urban Built-Up Areas by Integrating Night-Time Light and POI Data—A Case Study of Kunming, China[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 22417-22429.

[14] 李强, 吴庆双, 周华, 等. 基于Landsat 8数据和"珞珈一号"夜光数据的合肥建成区提取[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2021, 44(4): 354-361.
LI Qiang, WU Qingshuang, ZHOU Hua, et al. Hefei Built-Up Area Extraction Based on Landsat 8 Data and "Luojia No. 1" Luminous Data[J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2021, 44(4): 354-361.

[15] XU H. A New Index for Delineating Built-Up Land Features in Satellite Imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(14): 4269-4276.

[16] PERISSIN D, WANG T. Time-Series InSAR Applications over Urban Areas in China[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2011, 4(1): 92-100.

[17] WU Z R, MA P F, ZHENG Y, et al. Automatic Detection and Classification of Land Subsidence in Deltaic Metropolitan Areas Using Distributed Scatterer InSAR and Oriented R-CNN[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 290: 113545.

[18] QIN X Q, HUANG Y J, WANG C S, et al. A Temporary Soil Dump Settlement and Landslide Risk Analysis Using the Improved Small Baseline Subset-InSAR and Continuous Medium Model[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, 128: 103760.

[19] LIU Z Y, NG A H, WANG H, et al. Land Subsidence Modeling and Assessment in the West Pearl River Delta from Combined InSAR Time Series, Land Use and Geological Data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 118: 103228.

[20] DONG J, GUO S K, WANG N, et al. Tri-Decadal Evolution of Land Subsidence in the Beijing Plain Revealed by Multi-Epoch Satellite InSAR Observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 286: 113446.

[21] HU L Y, DAI K R, XING C Q, et al. Land Subsidence in Beijing and Its Relationship with Geological Faults Revealed by Sentinel-1 InSAR Observations[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 82: 101886.

[22] 麻源源, 左小清, 麻卫峰. 基于PS-InSAR的天津地区沉降监测及分析[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(6): 1324-1331.
MA Yuanyuan, ZUO Xiaoqing, MA Weifeng. Settlement Monitoring and Analysis of Tianjin Area Based on PS-InSAR[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(6): 1324-1331.

[23] 秦晓琼, 杨梦诗, 廖明生, 等. 应用PSInSAR技术分析上海道路网沉降时空特性[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(2): 170-177.
QIN Xiaoqiong, YANG Mengshi, LIAO Mingsheng, et al. Exploring Temporal-Spatial Characteristics of Shanghai Road Networks Settlement with Multi-Temporal PSInSAR Technique[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(2): 170-177.

[24] WANG R, YANG M S, YANG T L, et al. Decomposing and Mapping Different Scales of Land Subsidence over Shanghai with X- and C-Band SAR Data Stacks[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2022, 15(1): 478-502.

[25] 丁帮宁,黄海兰,邹进贵.基于SBAS-InSAR技术的武汉市地表形变监测研究[J].测绘通报,2022(S2):81-84.
DING Bangning, HUANG Hailan, ZOU Jingui. Research on Monitoring of Surface Deformation in Wuhan Based on SBAS-InSAR Technology[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022(S2):81-84.

[26] 王义梅,罗小军,于冰,等.郑州市地面沉降InSAR监测[J].测绘科学,2019,44(9):100-106.
WANG Yimei, LUO Xiaojun, YU Bing, et al. Monitoring Ground Subsidence in Zhengzhou with InSAR[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(9):100-106.

[27] 牛全福,陆铭,马亚娜,等.PS-InSAR技术在兰州市地面形变中的监测应用[J].科学技术与工程,2021,21(19):7909-7915.
NIU Quanfu, LU Ming, MA Ya'na, et al. Application of PS-InSAR Technology in Ground Deformation Monitoring of Lanzhou City[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(19):7909-7915.

[28] 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[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11):1816.

[29] 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.

[30] 朱茂,葛春青,班勇,等.基于InSAR的城市建筑安全监测技术研究[J].工业建筑,2024,54(2):51-57.
ZHU Mao, GE Chunqing, BAN Yong, et al. Research on Urban Building Safety Monitoring Techniques Based on InSAR[J]. *Industrial Construction*, 2024, 54(2):51-57.

[31] 李小玉,蒲智,李全胜.基于最大似然分类算法的土地利用变化特征分析[J].计算机与数字工程,2022,50(6):1153-1157.
LI Xiaoyu, PU Zhi, LI Quansheng. Analysis of Land Use Change Characteristics in Urumqi City Based on Maximum Likelihood Classification Algorithm[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2022, 50(6):1153-1157.

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

[33] 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.

[34] FARR T G, ROSEN P A, CARO E, et al. The Shuttle Radar Topography Mission[J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2):RG2004.

[35] HOOPER A, ZEBKER H A. Phase Unwrapping in Three Dimensions with Application to InSAR Time Series[J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2007, 24(9):2737-2747.

[36] SHI X G, CHEN D Q, WANG J N, et al. Refined Landslide Inventory and Susceptibility of Weining County, China, Inferred from Machine Learning and Sentinel-1 InSAR Analysis[J]. *Transactions in GIS*, 2024, 28(6):1594-1616.

[37] 秦煜杰.保山市城市规划区地面沉降风险性评价研究[D].昆明:昆明理工大学,2022.
QIN Yujie. Study on Risk Assessment of Land Subsidence in Baoshan Urban Planning Area[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.

[38] 广州市规划和自然资源局.广州面向2049的城市发展战略规划[EB/OL].[2024-02-08]. https://www.gz.gov.cn/xw/zwlb/bmdt/content/post_9488347.html.
Guangzhou Municipal Planning and Natural Resources Bureau. Guangzhou's Urban Development Strategy Plan for 2049[EB/OL]. [2024-02-08]. https://www.gz.gov.cn/xw/zwlb/bmdt/content/post_9488347.html.

[39] 广州市发展和改革委员会.广州市2024年重点建设项目计划[EB/OL].[2024-02-18]. https://fgw.gz.gov.cn/attachment/7/7595/7595460/9493056.pdf.
Guangzhou Municipal Development and Reform Commission. Guangzhou Key Construction Project Plan for 2024[EB/OL]. [2024-02-18]. https://fgw.gz.gov.cn/attachment/7/7595/7595460/9493056.pdf.

[40] 贾强,程林林,张鑫.地基不均匀沉降对框架结构影响的试验研究[J].土木工程学报,2011,44(11):79-86.
JIA Qiang, CHENG Linlin, ZHANG Xin. Experimental Study of the Influence of Differential Settlement on RC Frame Structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(11):79-86.

[41] 刘绍伟.基于工程应用的路基差异沉降控制标准及预测方法研究[D].西安:长安大学,2023.
LIU Shaowei. Study on Control Criteria and Forecasting Techniques for Differential Settlement in Subgrade Engineering Applications[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.