引文格式：范城城,代兴兰,王丽雅,等. 基于PS-InSAR技术的墨西哥城区地面形变监测研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(5): 127-128. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2025.05.027

基于PS-InSAR技术的墨西哥城区地面形变监测研究

范城城[1,2,3]，代兴兰[4]，王丽雅[4]，曲鹏程[5*]，韩　森[5]，潘佩珠[5]
（1. 中国科学院微小卫星创新研究院，上海 201210；2. 上海微小卫星工程中心，上海 201210；
3. 卫星数字化技术重点实验室（中国科学院），上海 201210；4. 中国矿业大学（北京）管理学院，北京 100083；
5. 北京航天长城卫星导航科技有限公司，北京 100032）

摘　要：地面沉降成为当前超大型城市快速发展过程中面临的重要问题，传统监测方法的时空分辨率较低，InSAR作为一种新型监测方法得到快速发展与应用。利用InSAR对墨西哥城市区域开展高精度形变监测，得到2020—2022年形变速率图和累积形变图，并对重点区域和典型地点进行专题分析，为科学决策提供数据支持。结果表明，2020年10月—2022年10月研究区整体形变明显，全市范围内形变速率/形变量较大的区域包括Iztapalapa、Cuauhtémoc、RAUL ROMERO、BOSQUES DE ARAGON等；最小形变速率/累积形变量位于Nezahualcóyotl的中部地区，其LOS向形变速率为-302.1 mm/a，累积形变量为-575.3 mm。同时，对部分区域进行了120 d的形变预测，结果显示形变范围在-600~100 mm之间。

关键词：PS-InSAR；地表形变；Sentinel-1；形变趋势预测；沉降监测
中图分类号：P227　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）05-0124-05

Research on Surface Deformation Monitoring Method in Mexico Urban Areas Based on PS-InSAR Technology

FAN Chengcheng[1,2,3], DAI Xinglan[4], WANG Liya[4], QU Pengcheng[5], HAN Sen[5], PAN Peizhu[5]
(1. Innovation Academy for Microsatellites of CAS, Shanghai 201210, China;
2. Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 201210, China;
3. Key Laboratory for Satellite Digitalization Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China;
4. School of Management, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;
5. Aerospace Great Wall Satellite Navigation Technology Co., Ltd., Beijing 100032, China)

Abstract: Surface subsidence has become an important issue facing the rapid development of super large cities. Traditional monitoring methods with low spatio-temporal resolution, and InSAR as a new type of monitoring method, has been rapidly developed and applied. In this study, we used InSAR to carry out high-precision deformation monitoring in urban areas of Mexico, obtained deformation rate maps and cumulative deformation maps from 2020 to 2022, and conducted thematic analysis of key areas and typical sites to provide data support for scientific decision-making. The results show that during October 2020 to October 2022, the overall deformation of study area is obvious. The areas with large deformation rate/deformation amount include Iztapalapa, Cuauhtémoc, RAUL ROMERO, BOSQUES DE ARAGON, etc. The minimum deformation rate/cumulative deformation is located in the central area of Nezahualcóyotl, with LOS deformation rate of -302.1 mm/a and cumulative deformation of -575.3 mm. At the same time, we conducted a deformation prediction for some areas for 120 days. The prediction results showed that the deformation range was -600~100 mm.

Key words: PS-InSAR, surface deformation, Sentinel-1, deformation trend prediction, settlement monitoring

地面沉降是一种由多种因素引起的连续、缓变、累积的地质灾害，对城市的经济发展、交通运输、资源调度和居住环境造成了巨大威胁[1-2]。精密水准沉降监测只能定期对沉降点进行观测，点位分散，时空分辨率较低，人力财力投入较大，形变信息获取效率较低；GNSS形变监测能对监测点进行24 h高频连续监测并进行危险预警，但只能获得监测范围内监测点位的形变信息，空间覆盖离散，且对观测环境有特定要求，对人力物力要求较高[3-5]。微波遥感成像技术具备分辨率高、准确率高和非接触式等优势，目前已成为地面沉降、建筑物形变监测等领域的研究重点和发展趋势。合成孔径雷达干涉测量（InSAR）技术具有精

项目来源：国防科技卓越青年科学基金资助项目（2021JCJQZQ017）。
第一作者简介：范城城（1986—），博士，副研究员，研究方向为信号与信息处理，E-mail：fancc@microsate.com。
通信作者：曲鹏程（1989—），硕士，高级工程师，研究方向为GNSS与遥感技术综合应用，E-mail：qupeng589@163.com。

度高、监测范围广、受天气影响小、监测实施方便、成本较低、安全性高等优点[6-7]，是大范围高精度形变监测的重要手段，可有效弥补上述方法的不足。InSAR形变监测已广泛应用于地震形变监测、火山运动跟踪、冰川漂移观测、城市沉降分析和山体滑坡预警等领域[8]。墨西哥城作为沿海城市，近年来城区部分地区年均下降程度达到惊人的30 cm[9-11]。为分析墨西哥城的沉降情况，本文利用InSAR技术对墨西哥城市区域开展高精度形变监测，得到了2020—2022年形变速率图和累积形变图，并对重点区域和典型地点进行专题分析，为科学决策提供数据支持。

1　研究区域与方法

1.1　研究区概况

墨西哥城位于墨西哥中南部高原的山谷之中，海拔高达2 240 m，与其毗邻的卫星城市被独立划分为一个联邦行政区——墨西哥联邦区。墨西哥城占地面积为1 525 km^2，截至2019年1月，总人口（包括周边卫星城）约为2 200万人，是美洲地区人口最稠密的都市区，也是全球海拔最高的都市区。城内汇聚了全国近半数的工业、商贸、服务业和银行金融业机构，不仅是国家的政治、经济、文化与交通中心，也是一座享誉国际的现代化大都市。墨西哥城属热带草原气候，凉爽宜人，年均气温约为18℃；全年分为雨季和旱季，6—10月初为雨季，全年75%~80%的降水集中在雨季。大部分市区建立在曾经干涸并被回填的湖泊上，这些干涸湖床遗留的土壤松软，导致该地区极易发生持续的地面沉降问题，还缺乏对地震等自然灾害足够的抵抗能力。墨西哥地处内陆，水资源匮乏，其首都墨西哥城人口众多，且每年都有大量移民前来居住，城市用水的70%来源于地下水。由于地下水的过度开采、自然水资源回补不足，造成地面沉降严重、地面建筑物大幅下沉。

1.2　研究数据

1）SAR数据。Sentinel-1卫星是欧洲航天局哥白尼计划框架下部署的地球观测卫星系统，包括两颗载有C波段SAR的卫星，可提供白天、夜晚以及各种天气情况下的连续图像。Sentinel-1卫星赋能对地观测市场，可实现全球覆盖，无论昼夜或恶劣气候均能保持高效观测；其提供的中分辨率、高精度图像支持高干涉与极化测量，并以高效便捷的方式提供产品服务，满足多样化需求[12]。本文选取了2020年10月—2022年10月的30期覆盖墨西哥城主城区的Sentinel-1卫星C波段（5.6 cm）SAR影像数据，并进行了适当裁剪；成像模式为干涉宽幅；空间分辨率为5 m×20 m；升轨，VV单极化；侧视角为44°；数据级别为SLC数据（单视复影像）。

2）DEM数据。本文采用航天飞机雷达地形测绘使命（SRTM）30 m分辨率的地形数据，主要由美国航空航天局和美国国防部国家测绘局联合测量。SRTM数据采用16位数值表示高程数值，覆盖9 000 m至-12 000 m（海平面以下）。目前该数据的全球分辨率为1弧秒（约30 m）。

本文数据预处理采用北京航天长城卫星导航科技有限公司自主研发的InSAR数据处理软件，能完成SLC数据导入、精轨校正、单视/多视处理、基于雷达信号滤波、正射纠正/配准、形变分析（差分干涉、点目标干涉分析）、地理编码等数字产品全过程处理。

1.3　PS-InSAR技术方法

PS-InSAR技术依托于永久散射体（PS）的点分析干涉测量，这些PS点即便在时间或空间基线较长的情况下，也能保持出色的相干性和稳定性，常见于人造建筑和裸露的自然岩石等。利用这些离散分布的PS点能获取可靠的相位数据，从而精确反演出形变和高程信息[13-16]。PS-InSAR技术的基本流程为：①假设研究区内存在 M 幅SAR影像，指定其中1幅为主影像，其余为辅影像，生成 $M-1$ 幅差分干涉图；②从按时间排列的SAR图像中选取具有高相干性的点作为PS点；③对PS点进行时间序列分析，并提取目标物的形变量；④获得覆盖整个研究区的地表形变场[17-18]。

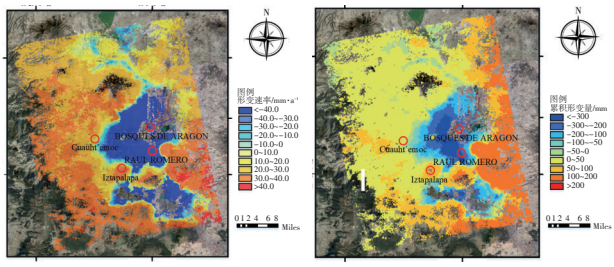
整个过程中最关键的是PS点的选取，由于墨西哥城拥有丰富的人工建筑物，因此本文采用基于幅度信息的PS点选取方法。振幅离差法是一种基于幅度信息的方法，用于从SAR时间序列中挑选PS点[19]。由于PS散射的稳定性体现在其回波振幅在时间序列上具有一定的统计规律，并可通过振幅离差 D_A 来定量表示，即振幅标准偏差与振幅均值的比值。设置一个适合的振幅离差阈值 T_D，若各像素对应的 $D_A(i,j)\leqslant T_D$，则将该像素作为PS点。通过相干系数与振幅离差双阈值法进行筛选，首先采用相干系数阈值法初步筛选出具有高相干系数的像素作为PS候选点，再利用 T_D 对这些候选点进行精选，将散性稳定的点作为PS点。

2　研究结果与分析

2.1　形变速率与累积形变分析

基于研究区2020年10月—2022年10月的30景空间分辨率为5 m×20 m的SLC数据，采用PS-InSAR技

术获取了墨西哥主城区范围的地表形变信息，共得到560 837个PS点，每个PS点包括位置、形变速率等信息。2020年10月—2022年10月墨西哥主城区覆盖范围的年均形变速率和累积形变量见图1，可以看出，形变速率最小值为−302.1 mm/a，最大值为49.7 mm/a；累积形变量最小值为−575.3 mm，最大值为205.2 mm，最小形变速率/累积形变量位于RAUL ROMERO附近；研究区形变非常明显，主城区形变速率/形变量较大的区域包括Iztapalapa、Cuauhtémoc、RAUL ROMERO、BOSQUES DE ARAGON等。



a 形变速率　　b 累积形变量

图1 2020年10月—2022年10月墨西哥主城区形变速率和累积形变量

2.2 形变速率剖线分析

在2020年10月—2022年10月墨西哥主城区年均形变速率图的基础上，本文绘制了4条剖线AA’~DD’（图2），剖线形变速率结果见图3。剖线分析可以更加直观地了解两区域间具体的形变速率变化情况。根据剖线结果和年均形变速率图，结合当地的城区分布分析发现，在Nezahualcóyotl的中部地区，LOS向年均形变速率可达−302 mm/a，该区域绝大部分地区都出现了大幅地面沉降（剖线AA’、CC’）；在Gustavo A. Madero和Venustiano Carranza的东部地区以及Iztapalapa的东北部地区也存在较大规模的沉降现象，在Iztapalapa观测到接近−180 mm/a的峰值；在Cuauhtémoc的Zócalo广场大都会大教堂的关键地标处，出现了100~−130 mm/a的LOS向形变速率（剖线BB’、DD’）。墨西哥城贝尼托Juárez国际机场以及新国际机场Texcoco的LOS向年均形变速率分别高达−163 mm/a和−215 mm/a。这些区域的InSAR结果覆盖较稀疏，甚至出现了失相干现象，其原因在于该区域正在进行建设工程和新机场建设。

剖线形变速率结果显示，由特斯科科湖边缘向湖中心存在形变速率逐渐增大的趋势，同时存在急剧变化的现象，这是由于区域的地质情况不同：坚硬火山岩（玄武岩熔岩流、凝灰岩和含砾石的砂层）区域形变速率变化较稳定，在过渡带的砂、粉砂和粘土斜坡沉积物上，沉降速率逐渐增加，构成含水层的柔软且高度可压缩的第四纪粘土和富含粉砂的古湖泊沉积物的湖中心区域，沉降速率显著增加。由剖线形变速率变化可知，在湖泊沉积物与硬岩单元（火山构造）之间的过渡区域存在非常大的沉降梯度变化，易受地表断裂的影响，会对城市基础设施造成严重的破坏，如Nezahualcóyotl的东南部和Iztapalapa。Venustiano Carranza、Iztapalapa的Pe~nón de los Baños和Pe~nón del Marqués周围、Iztapalapa和Tláhuac的圣卡塔琳娜山脉山麓以及Sierra de Chichinautzin在Xochimilco和Tláhuac的北部过渡区都属于高危险区。

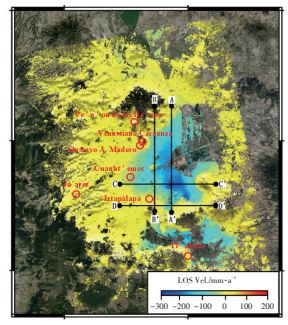


图2 墨西哥主城区剖线示意图

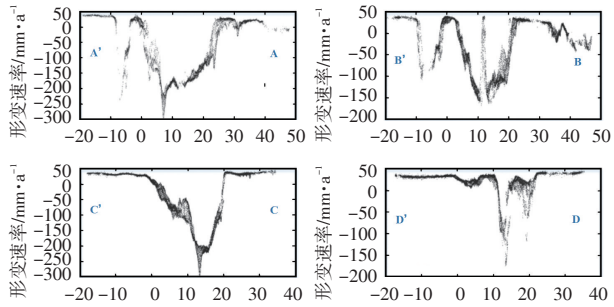


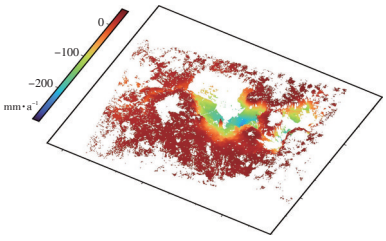
图3 墨西哥主城区剖线形变速率图

2.3 三维视图

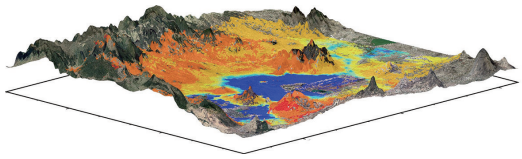
三维视图可以增强对研究区域形变速率的感知，叠加地形图可清晰展现形变与区域地形之间的关系。由图4可知，Pe~nón del Marqués、Cerro de la Estrella、Pe~nón de los Ba~nos、Xico、Cerro del Elefante、Cerro Tultepec和其他火山区域是主要沉降区内的地面稳定性“小岛”。由古湖床组成的水体固结是墨西哥城主要的变形过程，特别是Sierra de Guadalupe和Zumpango lagoon之间的城区是沉降速率最大的区域，该区域为湖泊沉积物层。南部的原湖泊Chalco和Xochimilco地区下沉也很明显。

2.4 形变趋势预测

组合预测法是一种综合性预测方法，融合了灰色系统模型、时间序列分析和人工神经网络预测等多种信息来源，并以某种方式进行适当的组合。首先采用



a 三维展示图



b 叠加地形图

图4　墨西哥主城区形变速率三维展示图和叠加地形图

多种单项预测技术对目标对象进行独立预测，再对这些独立的预测结果进行加权平均处理，最后取其加权平均值作为最终的预测结果。本文利用该方法预测墨西哥主城区不同点位（图5）的形变趋势，点位形变量和预测结果见图6，蓝色线为已有形变数值，红色线为预测值，以第一幅影像为起始时刻，预测时间为120 d，可以看出，墨西哥主城区3个点的形变范围在−600~100 mm之间，形变较大。

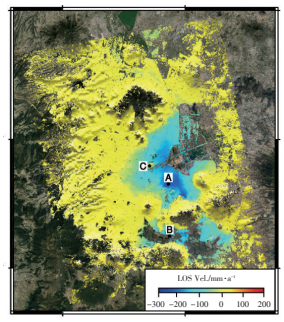
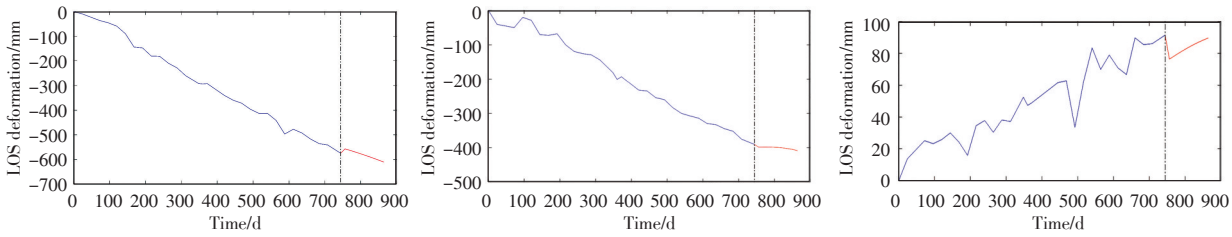


图5　墨西哥主城区形变预测点位示意图



a A点　　b B点　　c C点

图6　墨西哥主城区3个点的形变预测结果

3 结　语

本文主要基于长时间序列雷达数据，采用PS-InSAR技术对墨西哥城主城区进行了高精度连续形变监测与分析，同时将形变结果与地形进行三维展示，多角度立体化呈现墨西哥城主城区的形变情况，并对个别点位进行形变趋势预测。

1）本文选取覆盖墨西哥城主城区范围，2020年10月—2022年10月共30期的分辨率为5 m×20 m的Sentinel-1A卫星重复轨道SAR影像。获取的影像具有不模糊、不散焦的特点，且无明显错行、断行以及无掉线、条带、增益过度等现象。

2）基于长时间Sentinel-1A SAR影像序列，采用PS-InSAR技术提取影像覆盖范围内2020年10月—2022年10月的PS点，共计560 837个。

3）Sentinel-1A卫星的PS-InSAR结果显示，2020年10月—2022年10月研究区整体形变明显，全市范围内形变速率/形变量较大的区域包括Iztapalapa、Cuauhtémoc、RAUL ROMERO、BOSQUES DE ARAGON等；最小形变速率/累积形变量位于Nezahualcóyotl的中部地区，其LOS向形变速率为−302.1 mm/a，累积形变量为−575.3 mm。

4）基于InSAR监测结果，对墨西哥城主城区重点区域进行了形变与危险性分析，并对部分区域进行了120 d的形变预测。

参考文献

[1] 薛天祥，沈春勇，陈润泽. 地面沉降的监测技术及治理措施[J]. 工程建设与设计，2021(22):20-22

[2] 林珲，江利明，赵卿. 城市地面沉降及其D-InSAR监测[C]// 灾害风险管理与空间信息技术防灾减灾应用研讨交流会论文集，成都，2007

[3] 张君怡，刘俊杰，陈丹洁，等. 基于PS-InSAR的深圳市地表形变监测研究[J]. 测绘与空间地理信息，2023，46(5):43-46

[4] 王彩霞，王文喜. 基于GNSS技术的地面沉降监测方法研究[J]. 华东科技(学术版)，2014(12):11-14

[5] 高建东，安江雷. 精密水准测量在区域地面沉降监测中的应用[J]. 科技创新与应用，2023，13(4):190-192

[6] 邓辉，黄润秋. InSAR技术在地形测量和地质灾害研究中的应用[J]. 山地学报，2003，21(3):373-377

[7] 许强，董秀军，李为乐. 基于天—空—地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2019，44(7):957-966

[8] 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):1 717-1 733
[9] 张金盈,崔靓,刘增珉,等. 利用 Sentinel-1 SAR 数据及SBAS技术的大区域地表形变监测[J]. 测绘通报,2020(7):125-129
[10] Li D,Hou X,Song Y,et al. Ground Subsidence Analysis in Tianjin (China) Based on Sentinel-1A Data Using MT-InSAR Methods[J]. Applied Sciences,2020,10(16):5 514
[11] Liu X,Wang Y,Yan S,et al. Ground Subsidence Characteristics Associated with Urbanization in East China Analyzed with a Sentinel-1A-based InSAR Time Series Approach[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2019,78(6):4 003-4 015
[12] Virk A S,Singh A,Mittal S K. D-insar Based Ground Subsidence Evaluation of Different Topographical Sites with Sentinel-1A/B Platforms[J]. International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration,2018,48(5):426-439
[13] 龚桃,杨晓霞. 基于PS-InSAR技术的乌鲁木齐沉降监测与分析[J]. 城市勘测,2023(3):82-86
[14] 陈基伟. PS-InSAR技术地面沉降研究与展望[J]. 测绘科学,2008,33(5):88-90
[15] 范军,陈筠力,李相东,等. 基于永久散射体合成孔径雷达干涉测量技术的地面沉降监测[J]. 上海航天(中英文),2023,40(2):118-125
[16] 司新毅,谢新民,李盛. 基于PS-InSAR和随机森林的天津区域地表形变监测[J]. 大地测量与地球动力学,2023,43(7):692-695
[17] 魏以宽,闵天,邹崇尧,等. 基于InSAR的武汉地区2016—2021年地面沉降监测[J]. 地理空间信息,2023,21(10):69-72
[18] 梁珂,李文阳,王宏宇,等. 建筑沉降监测与组合预测模型研究[J]. 地理空间信息,2022,20(7):26-31
[19] Ferretti A,Prati C,Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2001,39(1):8-20

(上接第108页)

字化发展提供统一的三维空间信息底座，实现各类社会、经济和行业专题信息的时空化关联整合，支撑多元化时空应用场景[15]。当前，实景三维应用场景数量激增，广泛应用于政府决策、经济发展和自然资源管理等领域，但现行的实景三维应用场景分类分级标准较简单，且未针对设计方案形成科学系统的评价机制，阻碍了实景三维应用的广泛深入发展。本文基于AHP法，结合实景三维应用场景的技术、经济、效益等特点，构建了实景三维应用设计方案评价模型，弥补了相关研究的空白，为自然资源领域的实景三维项目方案优化比选提供了参考依据[16-18]。基于实景三维支撑耕地保护的应用实例，利用该评估模型确定了最佳实施方案，不仅增强了实景三维应用场景横向对比的直观性，为管理者的科学决策提供了数据支持；而且确保了项目资源的合理配置，促进了实景三维应用场景个性化建设与体系建设相匹配，提升了实景三维支撑自然资源管理的水平。

参考文献

[1] 黄明伟,李梦梦,陈超,等. 实景三维在自然资源监测的应用[J]. 测绘通报,2023(10):150-153
[2] 乐黎明,覃雪梅,王祥,等. 实景三维模型的建设技术与应用[J]. 地理空间信息,2022,20(11):96-99
[3] 江文源,杨如军,刘琦,等. 基于实景三维技术的广西自然资源三维立体“一张图”应用研究[J]. 自然资源信息化,2022(2):80-86
[4] 张宏飞. 省级三维立体自然资源“一张图”建设方案研究与应用:以新疆为例[J]. 测绘与空间地理信息,2023,46(7):111-113
[5] 蔡振锋,彭斌,季霞,等. 地市级实景三维城市建设及应用:以实景三维临沂建设为例[J]. 测绘通报,2021(11):115-119
[6] 陈泽鹏,刘雪俊,赵国梁,等. 省级全域三维空间数据库建设及应用:以广东省为例[J]. 自然资源信息化,2022(2):75-79
[7] 林勇军,梁瑞松. 自然资源三维分析系统框架研究与应用探索[J]. 地理空间信息,2024,22(6):74-76
[8] 王金娜,焦学军,宋会传,等. 基于CESIUM的露天矿山实景三维智能监管技术研究[J]. 地理空间信息,2021,19(8):93-96
[9] 冷顺绿,郑朝治,刘春梅. 实景三维信息系统在林权不动产登记中的应用[J]. 地理空间信息,2019,17(5):108-110
[10] 肖建华,李海亭,李鹏鹏,等. 实景三维的内涵与分类分级[J]. 城市勘测,2021(5):5-10
[11] 丁香乾,石硕. 层次分析法在项目风险管理中的应用[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2004,34(1):97-102
[12] 杨中杰,朱羽凌. 绿色工程项目管理发展环境分析与对策[J]. 科技进步与对策,2017,34(9):58-63
[13] 张捷,张文光. 基于层次分析法的项目优先级评价模型研究[J]. 项目管理技术,2016,14(8):51-55
[14] 齐爱民,盘佳. 数据权、数据主权的确立与大数据保护的基本原则[J]. 苏州大学学报(哲学社会科学版),2015,36(1):64-70
[15] 李鹏鹏,孙雅庚. 实景三维与多源数据融合技术的研究和应用[J]. 测绘通报2019(增刊1):133-136
[16] 张光伟,吴昊,郭震冬. 实景三维多源数据场景融合[J]. 测绘通报,2022(8):155-159
[17] 王芮,严立,陆文雨. 融合实景三维信息的三维地籍空间模型构建与应用探索[J]. 测绘通报,2021(增刊1):6-9
[18] 陈军,刘建军,田海波. 实景三维中国建设的基本定位与技术路径[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(10):1 568-1 575