引文格式：李益敏 ,计培琨 ,杨雪 ,等. 基于PS-InSAR技术的地表形变监测与驱动力分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(9): 61-66. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2024.09.013

# 基于PS-InSAR技术的地表形变监测与驱动力分析

李益敏[1,2]，计培琨[1*]，杨　雪[1]，李媛婷[3]，冯显杰[3]，向倩英[3]
（1. 云南大学 地球科学学院，云南 昆明 650500；2. 云南省高校国产高分卫星遥感地质工程研究中心，云南 昆明 650500；
3. 云南大学 国际河流与生态安全研究院，云南 昆明 650500）

**摘　要：**以昆明市官渡区为研究区，基于PS-InSAR技术，结合2019年1月—2021年12月覆盖官渡区的36幅Sentinel-1A升轨数据和36幅Sentinel-1A降轨数据，提取研究区内沿雷达视线向地表形变速率，并结合地理探测器对坡度、坡向、高程、降雨量、土地覆被类型、道路密度、距铁路的距离以及距地铁的距离进行单因子和多因子交互的驱动力分析。结果表明，升轨形变速率范围为-30.67～18.27 mm/a，降轨形变速率范围为-24.58～24.36 mm/a，共识别出4个沉降漏斗；通过升降轨数据的交叉验证，证明了利用PS-InSAR技术监测地表形变的可行性；距铁路的距离对官渡区地表形变空间分异的影响最强，同时多因子交互作用增强了地表形变的空间分异。

**关键词：**地表形变；PS-InSAR；地理探测器；升降轨；官渡区
**中图分类号：**P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）09-0061-06

# Surface Deformation Monitoring and Driving Force Analysis Based on PS-InSAR Technology

LI Yiming[1,2], JI Peikun[1], YANG Xue[1], LI Yuanting[3], FENG Xianjie[3], XIANG Qianying[3]
(1. School of Earth Science, Yunnan University, Kunming 650500, China;
2. Research Center of Domestic High-resolution Satellite Remote Sensing Geological Engineering, Kunming 650500, China;
3. Institute of International River and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** Based on PS-InSAR technology, we extracted the deformation rate along the radar line of sight to the surface through 36 Sentinel-1A ascending data and 36 Sentinel-1A descending data of Guandu District in Kunming from January 2019 to December 2021. And then, we used geographical detector to analyze the driving force of single-factor and multi-factor interactions on slope, aspect, elevation, rainfall, land cover type, road density, distance from railway and distance from subway. The results indicate that the deformation rate of ascending track ranges from -30.67 to 18.27 mm/a. The deformation rate of descending track ranges from -24.58 to 24.36 mm/a. Four subsidence funnels have been detected. The cross-validation analysis through ascending track and descending track data proves that it is feasible to use PS-InSAR technology to monitor surface deformation. At the same time, the distance from railway is the strongest influence factor on the spatial differentiation of surface deformation in the Guandu District, and the interaction of multiple factors enhances the spatial differentiation of surface deformation.

**Key words:** surface deformation, PS-InSAR, geographical detector, ascending and descending track, Guandu District

地表形变引起的地面沉降是指一个地区受人类生产生活影响和地下松散固结压缩而导致的地球表面高程降低[1]，是许多城市常见的地质灾害之一，严重阻碍了城市的可持续发展。因此，对城市地表进行监测尤为重要。传统的地面监测（GPS测量、水准测量等）只能获得小范围的地表形变信息，无法获取连续的面状区域形变量，且难以预测地表形变的发展趋势[2-4]。近年发展起来的合成孔径雷达干涉测量（InSAR）技术，是一种新型的主动微波遥感技术，不受天气、时间、人为等因素干扰，可快速、低成本获取研究区内大范围高精度的地表形变监测数据[5-6]，很好地克服了传统测量技术的局限性，已成为监测地表形变的热门技术。Ferretti A[7]等在合成孔径雷达差分干涉测量（D-InSAR）[8]的基础上，提出了永久散射体

收稿日期：2022-11-25。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（41161070）；教育部产学合作育人资助项目（202102245027、202102136010）；云南省科技厅—云南大学联合基金重点资助项目（2019FY003017）。
第一作者简介：李益敏（1965—），本科，研究员，主要从事3S技术在山地环境与地质灾害中的应用的教学和研究工作，E-mail：liyimin1965@163.com。
通信作者：计培琨（1995—），硕士研究生，主要从事地质灾害早期识别与防治工作，E-mail：1491011275@qq.com。

合成孔径雷达干涉测量技术（PS-InSAR），放弃了受严重干扰的像元，只关注研究区范围内成像特征较稳定的目标（PS点）。电力塔、桥梁、地面建筑物、堤坝、裸岩等目标物基本上不受失相干噪声的影响，在多年多幅雷达影像中都体现了相干性，因此将这些目标物统称为永久散射体。通过分析永久散射体的相位组成，利用每个相位分量的时频特性，分离出大气相位，获得更精确的地表形变信息。PS-InSAR技术更适用于有大量人工建筑的城市区域，如监测城市地表[6,9-11]、交通道路[12-13]、水库[14-15]等。地理探测器是一种探索和利用空间差异性的工具，于2017年提出[16]。地理探测器不仅能探究单个因子的影响力，还能探究多因子之间的交互作用，被广泛用于社会科学[17-18]和自然科学领域[19-20]。由于地表形变的驱动因素较复杂，可通过地理探测器定量分析探究单个驱动因素以及不同驱动因子组合对地表形变空间分异的解释程度[1,21-23]。

昆明市位于我国西南构造盆地，是我国西南地区最早出现地面沉降现象的城市，土层以第四纪沉积物为主，土质松软，且地质和构造活动复杂，发育数条断裂带。官渡区作为昆明市的主要城区之一，城市化快速推进，城市人口和高层建筑迅速增加，加上滇池水体对岸边土壤的冲刷，使得官渡区发生严重的地表形变。虽然不少学者开展了对该区的地表形变监测[24-26]，却很少定量探究驱动地表形变的驱动因子，因此本文利用PS-InSAR技术监测了昆明市官渡区2019年1月—2021年12月的地表形变速率，并探究其空间分布特征；再利用地理探测器定量分析驱动因子和不同因子组合对地表形变空间分异的影响，揭示官渡区地表形变的影响机制，为地表形变科学防治提供参考。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

本文选取云南省昆明市官渡区作为研究区。官渡区是昆明市主城区之一，位于昆明市东南部、滇池北岸；全区交通发达，长水国际机场坐落该区，且数条主要公路和铁路穿境而过，是昆明市人流、物流的重要集散地；分别与宜良县、呈贡区、嵩明县、盘龙区、西山区接壤，是古滇文明重要的发祥地，海拔在1 886～2 731 m之间，属于低纬度高海拔区域；全区总面积为552 $km^2$；截至2020年11月，官渡区常住人口为160多万人。

### 1.2 数据来源

本文采用的雷达数据为欧空局发布的Sentinel-1A卫星数据（https://search.asf.alaska.edu/）。Sentinel-1A卫星是欧洲航天局哥白尼计划中的地球观测卫星，于2014年发射升空，搭载一个C波段合成孔径雷达，具备全天时、全天候、覆盖范围广、重返周期短等特点，可提供连续图像，在监测地表形变方面得到广泛的应用。本文选取2019年1月—2021年12月覆盖研究区的36景Sentinel-1A升轨数据和36景Sentinel-1A降轨数据（表1）。数字高程模型（DEM）数据采用ASTER GDEM 30 m数据，来源于地理空间数据云（http://www.gscloud.cn），用于去除地形相位。

表1 合成孔径雷达数据的参数

| 波段 | 波长/cm | 极化方式 | 数据类型 | 数据模式 | 轨道类型 | 轨道号 | 飞行方位角/(°) | 入射角/(°) | 时间间隔/d | 影像时间 | 数量/景 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C | 5.6 | VV | SLC | IW | 升轨 | 26 | -12.43 | 39.28 | 12 | 2019年1月—2021年12月 | 36 |
| | | | | | 降轨 | 62 | -167.59 | 39.34 | | | |

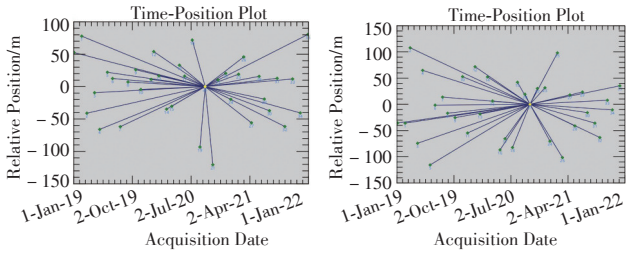
自然因素和人为因素的综合作用使得地表发生形变，因此在选取地表形变影响因子时必须全面考虑这两方面的因素。结合官渡区的实际情况，本文选取坡向、路网密度、距铁路的距离、土地覆被类型、高程、坡度、降雨量、距地铁的距离等影响因子，其中坡向、坡度和高程数据利用DEM数据进行提取；降雨数据来源于国家地球系统科学数据中心（http://www.geodata.cn/）；道路、铁路、地铁和土地覆被类型数据通过高清遥感影像（来源于Bigemap地图）提取。

## 2 研究方法

### 2.1 PS-InSAR技术

PS-InSAR技术建立在相干性很高的永久散射体上，利用多时相数据，估计并去除大气效应，从而获取高精度地表形变信息。本文利用PS-InSAR技术处理2019年1月—2021年12月覆盖研究区的升轨和降轨数据，再结合ENVI环境下的SARscape软件，获取研究内地表形变数据。其主要处理步骤包括：①数据裁剪，利用矢量文件分别在升轨和降轨数据中裁剪出研究区范围；②生成连接图，以其中一景为主影像，其余35景为辅影像，生成时空基线分布图（图1）；③干涉工作流，首先将所有的辅影像配准到主影像上，并生成35对干涉对，再利用外部DEM数据进行干涉相位的去平，最后计算振幅离差指数；④PS第一次反演，利用线性模型估算形变速率和残余地形，即$Disp = V \times (t - t_0)$，Disp为T时间段的形变，$V$为形变速率；⑤PS第二次反演，利用第一次反演结果估算大气相位成分，并去除大气相位成分，得到最终的形变

速率；⑥地理编码，获取地理坐标下的地表形变结果。




a 升轨　　b 降轨

图1　时空基线分布图

注：黄点为主影像。

### 2.2　地理探测器

地理探测器的实质是一组统计学方法，假设一个自变量 $q$ 对另一个因变量的空间分布具有重要影响，则 $q$ 和 $p$ 之间具有相似的空间分布[17,27]；反之，若 $q$ 和 $p$ 不具有相关性，则二者分布不会存在较大的一致性。地理探测器主要包括分异及因子探测器、交互探测器、风险探测器和生态探测器4类。本文中主要采用分异及因子探测器和交互探测器分析单一因子对地表形变空间分布的影响以及不同因子交互组合对地表形变的影响程度。

#### 2.2.1　因子探测器

因子探测器旨在探测各驱动因子 $X$ 对地表形变 $Y$ 空间分异的解释程度，取值范围为[0,1]，计算公式为：

$$q=1-\frac{\mathrm{SSW}}{\mathrm{SST}}=1-\frac{\sum_{a=1}^{K}N_a\sigma_a^2}{N\times\sigma^2}$$

式中，$a$ 为驱动因子 $X$ 的层数，$a=1,2,\cdots,K$；$N$、$N_a$ 分别为研究区的总单元数和驱动因子 $X$ 分区 $a$ 的单元数；$\sigma^2$、$\sigma_a^2$ 分别为地表形变 $Y$ 的方差和驱动因子分区 $a$ 的方差。

#### 2.2.2　交互探测器

交互探测器是探测驱动因子 $X_i$ 和驱动因子 $X_j$ 组合对地表形变 $Y$ 的解释程度。其交互类型见表2。

表2　驱动因子之间的交互作用类型

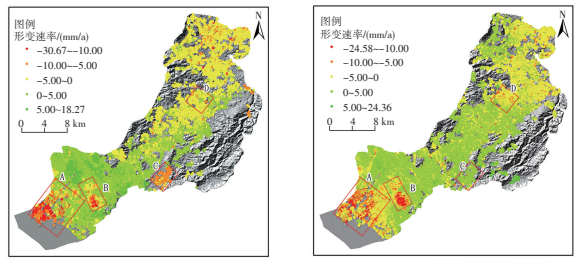
| 判断依据 | 交互类型 |
|---|---|
| $q(X_i)+q(X_j)<q(X_i\cap X_j)$ | 非线性增强 |
| $q(X_i)+q(X_j)=q(X_i\cap X_j)$ | 独立 |
| $q(X_i\cap X_j)<\min(q(X_i),q(X_j))$ | 非线性减弱 |
| $\min(q(X_i),q(X_j))<q(X_i\cap X_j)<\max(q(X_i),q(X_j))$ | 单因子非线性减弱 |
| $q(X_i\cap X_j)>\max(q(X_i),q(X_j))$ | 双因子增强 |

## 3　研究结果与分析

### 3.1　形变结果分析

本文结合Sentinel-1A的升、降轨数据，获取云南省昆明市官渡区的沿雷达视线向（LOS）的地表形变信息（图2），正值为靠近卫星方向，负值为远离卫星方向，可以看出，升轨数据共获得426 712个形变点，形变速率介于-30.67~18.27 mm/a；降轨数据共获得433 132个形变点，形变速率介于-24.58~24.36 mm/a，与升轨数据的形变结果分布较相似；升、降轨的形变结果中大多数区域的形变速率集中-5~5 mm/a，说明官渡区大部分地区较稳定。

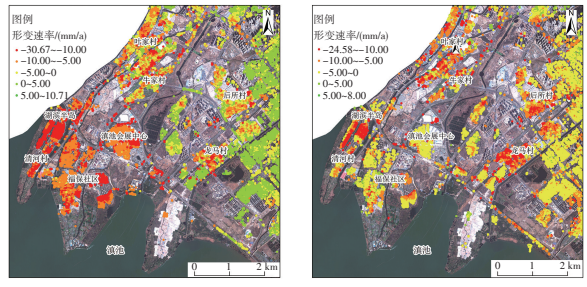
通过对比升、降轨沉降漏斗，识别出A、B、C、D四个地面沉降。区域A位于滇池旁（图3），升、降轨形变速率最大分别为-30.67 mm/a和-24.58 mm/a，该区域属于昆明市老城区，形变主要集中在清河村、湖滨半岛、叶家村、牛桥村、滇池会展中心、福保社区、龙马村、后所村一带，是官渡区较大的一个形变沉降区。通过查阅相关资料[28-29]发现，该区域长期存在形变。在研究时间段内，为在该区域打造环滇池生态宜居区，截至2021年建成了许多高层住宅，一方面建设过程中往往会创建数个基坑，扰乱土壤结构[30]；另一方面建筑物建成后，会持续对地表产生向下的压力，因此该区域出现了沉降漏斗。同时，该区域靠近滇池，地下水向滇池汇集，使得土层含水量大、地基过软，加上滇池水位季节性变化、对岸边的侵蚀，也加剧了该区域的地面沉降。




a 升轨　　b 降轨

图2　官渡区LOS向形变速率结果

审图号：云S(2021)67号



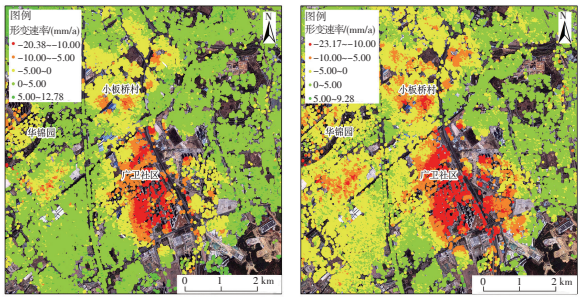

a 升轨　　b 降轨

图3　区域A的LOS向形变速率结果

审图号：云S(2021)67号

区域B的形变区域集中在小板桥村、广卫社区附近（图4），升轨形变速率范围为-20.38~12.78 mm/a，降轨形变速率范围为-23.17~9.28 mm/a，该区域人口密集，为满足正常的生产生活需要，地下水开采严重，虽然昆明市出台了限制地下水开采的规定，但仍未得到有效抑制[9]。同时，该区域周边的建筑密度较大，稠密的建筑群使软土层易被压实；沉降区内还

经过东绕城高速、昆磨高速公路和地铁4号线，因此地面两条交通干道上巨大的车流荷载以及地下工程建设和地下水超采是该区域地表发生形变的主要原因。



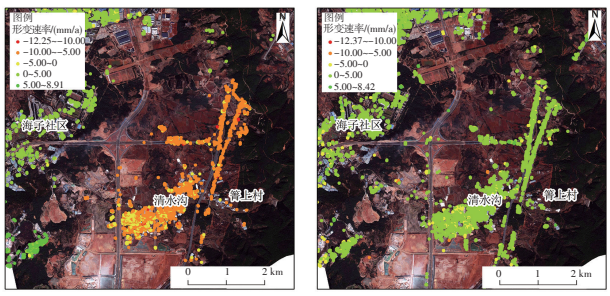

a 升轨 b 降轨

图4 区域B的LOS向形变速率结果

审图号：云S(2021)67号

区域C位于官渡区清水沟、箐上村附近，属于官渡区的郊区（图5）。对比升、降轨的形变结果发现，升轨形变以负值为主，最大形变速率为−12.25 mm/a；降轨形变以正值为主，最大形变速率为8.42 mm/a。该区域是官渡区最新的沉降漏斗区，且以水平向形变为主，结合高清影像发现其附近存在人为工程活动，周围的耕地、林地被改造成建设用地，且兴建了数条公路和一条铁路，推测在改造过程中施工周围区域出现了地表形变，后续应当加大对该区域的形变监测。

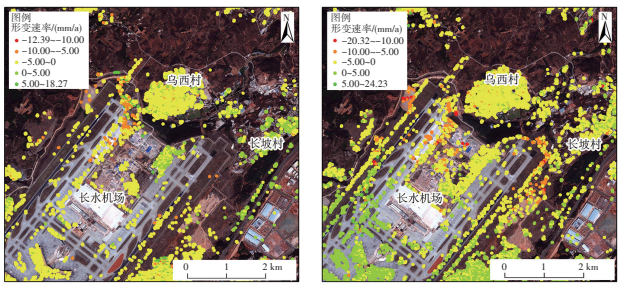
区域D位于官渡区北部区域，昆明长水机场附近（图6），升轨最大形变速率为−9.97 mm/a。由于长水机场正在进行扩建施工以及其他自然因素，导致该区域地表发生形变。




a 升轨 b 降轨

图5 区域C的LOS向形变速率结果

审图号：云S(2021)67号




a 升轨 b 降轨

图6 区域D的LOS向形变速率结果

审图号：云S(2021)67号

### 3.2 升降轨交叉验证

根据升降轨的形变结果，二者沉降漏斗的空间分布呈现出高度的一致性，为进一步验证地表形变结果的准确性，本文对升、降轨的形变数据进行交叉验证。由于升、降轨的轨道不同，需将LOS向形变结果转换为竖直向的结果。本文通过 $V_{垂直}=V_{LOS}/\cos\theta$（$V_{LOS}$ 为沿雷达视线向形变，$\theta$ 为入射角）获取研究区内垂直向的形变结果；再随机提取升轨中1 092个垂直向的形变速率点，同时对降轨形变数据进行插值，以提取相应位置的降轨形变速率结果；最后统一两个轨道之间的参考基准[31]。利用统一参考基准的两组数据计算升降轨地表形变的相关性（图7），两组数据呈线性分布，线性拟合方程的系数为0.592，相关系数为0.785，判定系数为0.616，说明两组数据具有很好的一致性和相关性，监测结果较可靠。

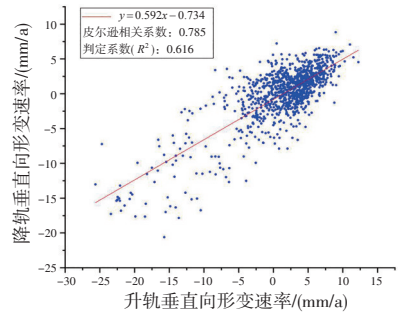



图7 统一参考基准后升轨和降轨相关性图

### 3.3 地表形变与影响因素的关系

本文采用地理探测器探究地表形变的驱动因素，选取坡度、坡向、高程、降雨量、土地覆被类型、道路密度、距铁路的距离和距地铁的距离等因子。为了更好地定量分析地表形变与各因子之间的关系，对各因子进行离散化。根据前人研究[1,24,32]，基于自然断点法将道路密度分为5类、降雨量分为3类、坡度分为8类、坡向分为9类、高程分为8类、距铁路的距离分为7类、距地铁的距离分为7类、土地覆被类型分为7类（图8）。

在升轨形变结果中随机提取10 241个点（图8a）作为因变量Y，道路密度（$X_1$）、坡向（$X_2$）、坡度（$X_3$）、土地覆被类型（$X_4$）、高程（$X_5$）、降雨量（$X_6$）、距铁路的距离（$X_7$）、距地铁的距离（$X_8$）作为自变量，导入地理探测器中进行因子探测和交互探测。

#### 3.3.1 单因子探测分析

借助地理探测器中的因子探测器模块，获取研究区地表形变空间分异的各驱动因子（表3），因子置信水平 $p$ 值为0，说明各因子对地表形变的空间分异具有显著作用；$q$ 值反映各因子对地表形变空间分异的影响程度，从大到小依次为$X_7$、$X_8$、$X_6$、$X_1$、$X_4$、$X_5$、

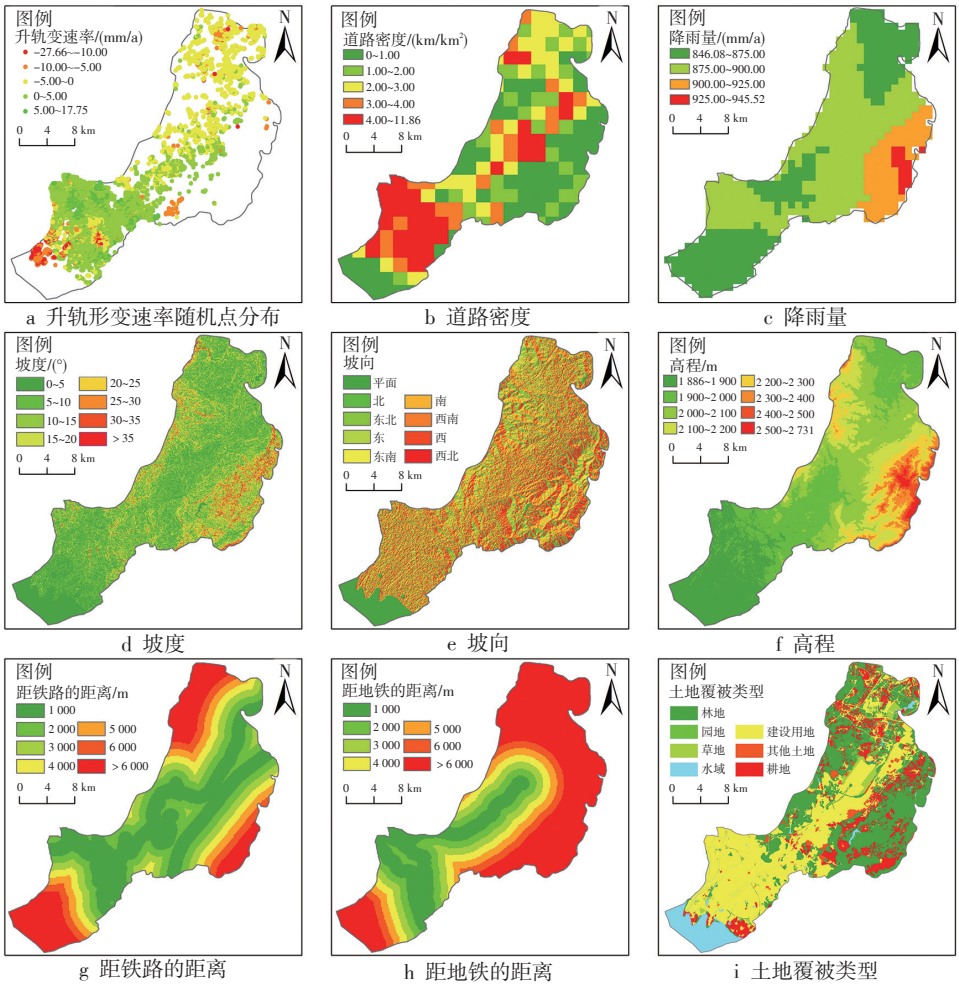



图8　各影响因子分布图

审图号：云S(2021)67号

$X_2$、$X_3$。因此，距铁路的距离以及距地铁的距离是2019—2021年昆明市官渡区地表变形的主要驱动力。除此之外，$X_2$和$X_3$的$q$值分别为0.002 6、0.002 4，表明这两个因子对地表形变空间分布的影响较小。

表3　驱动因子的$q$统计量和$p$值

| 因子 | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $X_7$ | $X_8$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $q$统计量 | 0.080 1 | 0.002 6 | 0.002 4 | 0.037 5 | 0.058 6 | 0.082 5 | 0.286 0 | 0.268 4 |
| $p$值 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

### 3.3.2　交互探测分析

交互探测器可识别不同因子的相互作用。驱动因子之间的交互探测结果见表4，可以看出，昆明市官渡区地表形变的空间分异不仅受到单一因子影响，而且因子之间的两两交互作用的$q$值大于单因子；其中$X_5$与$X_8$的交互$q$值最高，说明这两个因子对地表形变空间分异的影响最强，其次是$X_5$与$X_7$，$X_3$与$X_2$的$q$值最小，说明这两个因子构成的协同效应对地表形变空间分异的影响不大；同时，多因子交互作用的$q$值大于单因子，说明因子交互后对地表形变空间分异的影响具有增强效应。

表4　驱动因子交互探测结果

| | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $X_7$ | $X_8$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $X_1$ | 0.080 1 | | | | | | | |
| $X_2$ | 0.086 5 | 0.002 6 | | | | | | |
| $X_3$ | 0.089 3 | 0.010 3 | 0.002 4 | | | | | |
| $X_4$ | 0.102 2 | 0.043 0 | 0.042 9 | 0.037 5 | | | | |
| $X_5$ | 0.215 6 | 0.063 0 | 0.065 7 | 0.083 7 | 0.058 6 | | | |
| $X_6$ | 0.134 0 | 0.085 6 | 0.085 2 | 0.121 4 | 0.187 0 | 0.082 3 | | |
| $X_7$ | 0.365 7 | 0.296 3 | 0.294 1 | 0.334 2 | 0.406 3 | 0.326 4 | 0.286 0 | |
| $X_8$ | 0.335 2 | 0.279 3 | 0.283 0 | 0.290 0 | 0.456 3 | 0.332 1 | 0.402 6 | 0.268 4 |

## 4 结 语

随着城市化的不断推进，地面沉降已成为昆明市最严重的地质灾害之一，对人们的生产生活造成了严重影响。本文利用2019年1月—2021年12月的Sentinel-1A升降轨数据，基于PS-InSAR技术获取昆明市官渡区的地表形变信息，同时利用地理探测器定量分析了地表形变的主导因子以及因子之间的交互作用。

1）官渡区整体地表形变稳定，升、降轨LOS向最大形变速率分别为-30.67 mm/a和-24.58 mm/a。结合升、降轨数据共识别出4个较明显的沉降漏斗：区域A（六甲社区、清河村、龚家村、牛桥村、滇池会展中心附近、龙马村、后所村、姚家坝）、区域B（小板桥村、广卫社区）、区域C（清水沟、箐上村）、区域D（昆明长水机场），其中区域A是昆明市老城区，是官渡区最大的形变区域。

2）联合升、降轨形变结果进行交叉验证，两组数据的判定系数为0.616，说明二者之间存在很好的一致性，证明监测结果较可靠。

3）利用地理探测器中的因子探测器和交互探测器进行分析，单因子中$X_7$的$q$值最大（0.286 0），对地表形变空间分异的影响最强；$X_5$与$X_8$的交互$q$值最大（0.456 3），对地表形变空间分异的影响最强，且因子交互后对地表形变空间分异的影响具有增强效应。

然而，本文的验证方式存在不足，由于缺乏研究区的水准数据等实测数据，无法利用实测数据验证InSAR监测结果的准确性，在后期考虑收集实测数据，以验证监测结果；同时，在选择驱动因子时未考虑地下水、部分地质构造等部分因子，后期可获取更多的驱动因子，使研究结果更加完善。

## 参考文献


[1] 王文辉，何毅，张立峰，等. 基于PS-InSAR和GeoDetector的兰州主城区地表变形监测与驱动力分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版)，2021，57(3)：382-388

[2] 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)：7 909-7 915

[3] 刘欢欢，范景辉，陈建平，等. 基于相位空间相关性分析的PSInSAR技术在地面沉降监测中的研究与实践[J]. 地理与地理信息科学，2012，28(3)：15-19

[4] Malik K，Kumar D，Perissin D，et al. Estimation of Ground Subsidence of New Delhi，India Using and Multi-sensor Radar Data[J]. Advances in Space Research the Official Journal of the Committee on Space Research，2021，69(4)：1 863-1 882

[5] 刘国祥. 合成孔径雷达遥感新技术：InSAR介绍[J]. 四川测绘，2004，27(2)：92-95

[6] 熊威，孙志杰，张必昌. 升降轨时序InSAR技术监测天津市地面沉降[J]. 地理空间信息，2021，19(12)：45-49

[7] Ferretti A，Prati C，Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，2002，39(1)：8-20

[8] Gabriel A K，Goldstein R M，Zebker H A. Mapping Small Elevation Changes over Large Areas：Differential Radar Interferometry[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth，1989，94(B7)：9 183-9 191

[9] 麻源源，陈云波，左小清，等. Sentinel-1A数据及短基线集的昆明地面沉降分析[J]. 测绘科学，2019，44(11)：59-66

[10] 吴平，袁存忠. 基于PS-InSAR技术的泉州欣佳怡酒店建筑沉降分析[J]. 地理空间信息，2021，19(4)：105-108

[11] 马丽，罗建洪，王波，等. 基于PS-InSAR方法的个旧市地表形变监测[J]. 地理空间信息，2021，19(11)：54-56

[12] 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)：2 050-2 057

[13] Suresh K，Kim D J，Kim Y C. Time-series InSAR Analysis and Post-processing Using ISCE-StaMPS Package for Measuring Bridge Displacements[J]. Korean Journal of Remote Sensing，2020，36(4)：527-534

[14] 熊寻安，王明洲，龚春龙. MT-InSAR技术监测水库土石坝表面变形研究[J]. 测绘地理信息，2019，44(5)：78-81

[15] Wu H，Zheng X Y，Fan H D，et al. Deformation Monitoring of Tailings Reservoir Based on Polarimetric Time Series InSAR：Example of Kafang Tailings Reservoir，China[J]. Remote Sensing，2022，14(15)：3 655-3 658

[16] 王劲峰，徐成东. 地理探测器：原理与展望[J]. 地理学报，2017，72(1)：116-134

[17] 申玉坤，骆华松，洪菊花，等. 基于“一带一路”的拉丁美洲地缘风险空间分异格局及驱动因素[J]. 热带地理，2021，41(6)：1 222-1 235

[18] 陈慧霖，李加林，王中义，等. 乡村振兴背景下浙江省3A级景区村庄空间结构特征与影响因子分析[J]. 自然资源学报，2022，37(9)：2 467-2 484

[19] 张军民，荣城，董国松. 2000-2020年漓江流域景观生态脆弱性时空分异[J]. 水土保持研究，2022，29(5)：283-292

[20] 田浩，刘琳，张正勇，等. 2001-2020年中国地表温度时空分异及归因分析[J]. 地理学报，2022，77(7)：1 713-1 729


（下转第99页）