

武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 2007-2019 年武汉市地面沉降时空分异特征及地理探测机制  
作者: 张扬, 刘艳芳, 刘莹, 刘耀林, 陈雨露, 王征禹  
收稿日期: 2021-03-22  
网络首发日期: 2021-09-16  
引用格式: 张扬, 刘艳芳, 刘莹, 刘耀林, 陈雨露, 王征禹. 2007-2019 年武汉市地面沉降时空分异特征及地理探测机制. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1676.TN.20210916.1453.004.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

## 引用格式：

张扬,刘艳芳,刘莹,等. 2007-2019年武汉市地面沉降时空分异特征及地理探测机制[J].武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210143 (ZHANG Yang, LIU Yanfang, LIU Ying, et al. Spatial-temporal variation characteristics and geographic detection mechanism of land subsidence in Wuhan city from 2007 to 2019 [J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210143)

# 2007-2019 年武汉市地面沉降时空分异特征 及地理探测机制

张扬<sup>1,2</sup>, 刘艳芳<sup>3</sup>, 刘莹<sup>4</sup>, 刘耀林<sup>3</sup>, 陈雨露<sup>5</sup>, 王征禹<sup>3</sup>

1. 成都理工大学旅游与城乡规划学院, 成都 610059

2. 青藏高原及其东缘人文地理研究中心, 成都 610059

3. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079

4. 武汉市测绘研究院, 武汉 430022

5. 成都市经济发展研究院, 成都 610032

**摘要：**城市地区地面沉降造成地面高程损失, 威胁各类设施的安全运行, 影响地表径流和水文循环, 监测地面沉降现状并揭示其形成机制, 对于城市可持续发展具有重要意义。以 2007-2011 年的 ALOS-PALSAR 影像和 2015-2019 年的 Radarsat-2 影像为数据源, 基于小基线集技术 (small baseline subset interferometric synthetic aperture radar, SBAS-InSAR) 获取武汉市两个监测阶段的地面沉降速率、沉降时间序列, 并利用地理探测器揭示规划单元尺度地面沉降的主导驱动因子及驱动因子之间的交互作用机制。结果表明: ① 2007-2011 年和 2015-2019 年地面沉降平均速率分别为-3.53 mm/year 和-1.48 mm/year, 2007-2011 年地面沉降较为显著的 4 个区域是汉口、沙湖沿岸及以北、南湖以西和白沙洲地区, 2015-2019 年为汉口、沙湖北、白沙洲地区。②局部性、阶段性、与自然条件及人类活动相关是两个时期武汉市地面沉降演变的 3 个特点。③水文地质条件作为必要条件, 通过与地面荷载、地下空间开发、工程施工因素交互作用形成武汉市地面沉降时空格局, 2007-2011 年的工程施工因素、2015-2019 年的地面荷载因素与水文地质条件交互作用明显较强。

**关键词：**地面沉降; 小基线集成孔径雷达干涉测量; 时空格局; 地理探测器; 武汉市

收稿日期: 2021-03-22

基金项目: 成都理工大学珠峰引才计划科研启动项目 (10912-KYQD2020-08419) 资助。

第一作者: 张扬, 博士, 副研究员, 主要从事城市遥感研究工作。zhangyang2020@cdut.edu.cn

# 引言

地面沉降是指由于自然或者人为因素引起地质环境系统破坏,并导致地壳表层土体压缩、地面高程下降的一种环境地质现象<sup>[1-2]</sup>,具有持续时间长、空间范围广、变形速率慢等特点<sup>[3]</sup>。地面沉降是目前很多城市的通病<sup>[4]</sup>,包括北京、西安、佛罗伦萨、河内在内的全球 150 余个城市均有显著的沉降发生<sup>[5-9]</sup>。随着全球城市化进程的推进,由地下水过量开采、工程大规模建设等人为因素引起的地面沉降将更加严重<sup>[10,11]</sup>。地面沉降造成地面高程损失,威胁各类基础设施的安全运行,影响城市地表径流和水文循环<sup>[12,13]</sup>,给社会经济发展和人民生命财产安全造成威胁。我国仅长江三角洲地区因地面沉降造成的经济损失已经达到 3150 亿元人民币<sup>[14]</sup>。因此,开展城市地区地面沉降监测及其形成机制的研究对于城市可持续发展具有重要意义。

传统的地面沉降监测方法(水准测量、GPS 测量等)存在覆盖范围小、作业周期长、监测成本高等缺点<sup>[15]</sup>,而合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture Radar, InSAR)具有高时空分辨率、高监测精度及可进行持续性观测的优势<sup>[16,17]</sup>。时序 InSAR 技术,如小基线集技术(small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR),通过利用干涉叠加技术挖掘时间序列合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)图像,将监测精度提高至亚毫米级<sup>[18,19]</sup>。随着星载 SAR 数据(如 Sentinel-1、ALOS-PALSAR、Radarsat-1/2)的日益丰富,时序 InSAR 技术成为地面沉降监测的重要手段<sup>[20,21]</sup>。然而由于可免费获取的开放 SAR 数据有限,仍难以实现城市多时段的地面沉降监测和演变分析研究。针对国内城市的开展的地面沉降研究也多聚焦北京、上海、西安等位于地面沉降热点区域(华北平原、长江三角洲、汾渭盆地)的城市,而对位于其他区域正进行快速城市化和大规模工程建设的城市关注较少。

在地面沉降成因方面,早在 1956 年就有学者论述了地下水开采是地面沉降的主要诱因<sup>[22]</sup>,而后学者们发现了引起地面沉降的新构造运动和其他流体开采因素<sup>[23,24]</sup>。近年来,岩溶坍塌、土地利用、地面荷载、工程建设等人类活动因素对地面沉降的影响受到较多关注<sup>[25-27]</sup>,如 Xu 等<sup>[28]</sup>对比了深圳市 2007-2010 年填海开垦土地和陆域土地地面沉降速率,得出填海开垦土地更易发生显著地面沉降的结论。也有部分学者认为地面沉降是多种因素共同作用的结果,如 Shi 等<sup>[29]</sup>使用灰色关联度分析法识别上海市地面沉降的影响因素,认为上海市地面沉降受到地下水开采、建筑荷载等因素的复合影响;Amighpey 和 Arabi<sup>[30]</sup>对伊朗中部亚兹德省的地面沉降研究表明地下水抽水区含水层厚度和水力特征也对地面沉降产生重要影响。然而,定性和简单的相关分析不足以定量和准确地识别地面沉降的驱动因子及其之间的交互作用关系,难以揭示地面沉降的复杂成因。

近年来,武汉市的多个区域发生多起地面沉降,引起建筑物和道路开裂、下沉等一些列负面效应。监测武汉市的地面沉降并揭示其形成机制,对于未来工程建设的科学规划布局具有重要意义。本文基于 ALOS-PALSAR 和 Radarsat-2 影像,利用 SBAS-InSAR 技术监测武汉市 2007-2011 年、2015-2019 年两个历史时期地面沉降,分析其时空演变特征,并探讨水文地质条件、地面荷载、地下空间开发、工程施工等自然和人类活动因素对地面沉降的影响机制,以为地面沉降监测与防治提供理论支撑。

## 1 研究区、研究方法 with 数据

1.1 研究区

武汉市是湖北省省会城市，位于江汉平原东部的长江及其支流汉江交汇处， $113^{\circ}41'E\sim115^{\circ}05'E$ 、 $29^{\circ}58'N\sim31^{\circ}22'N$  之间。境内水资源丰富，河流、湖泊等水域面积占比达 26.1%，是我国典型的滨江滨湖城市（图 1）。现有建成区面积  $628\text{ km}^2$ ，主要集中在三环线以内，约占辖区总面积的 7.33%。近几年武汉市正处于城市建设高峰阶段，地下空间开发利用和轨道交通建设水平走在全国各大城市前列<sup>[31]</sup>。在水文地质条件方面，武汉市境内分布有襄-广深、舵落口、蒋家墩-青菱湖和五通口-汤逊湖等断裂带<sup>[32]</sup>，南部的扬子准地台第四系堆积物分布广泛<sup>[33]</sup>。自北至南分布有多条北西西-南东东走向的碳酸盐岩条带<sup>[34]</sup>，在长江、汉江两岸和湖泊周缘沉积区软土分布广泛且厚度较大<sup>[35]</sup>。

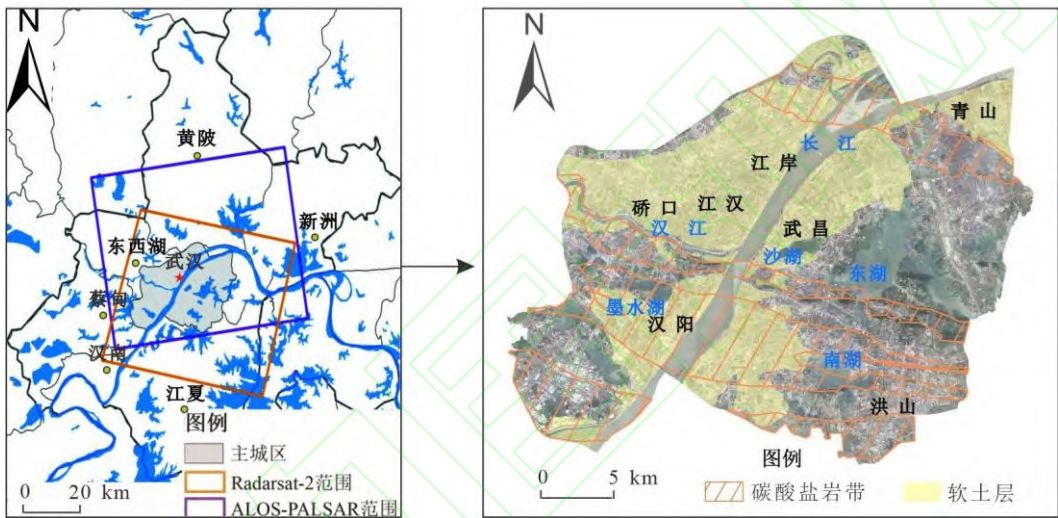


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

1.2 SBAS-InSAR

SBAS-InSAR 主要原理是将所有的 SAR 影像组合成若干个集合，计算每个集合的地表形变时间序列并对多个小基线集进行联合求解<sup>[36]</sup>。该方法可有效解决单个集合内时间采样不够的问题，得到覆盖整个观测时间的形变序列和平均沉降速率。其主要步骤有：①生成连接图——选取超级主影像，根据输入的时间基线和空间基线阈值生成 SAR 数据对连接图；②差分干涉——对所有的配对的干涉像对进行相干性生成、去平、滤波和相位解缠，并配准到超级主影像上；③轨道精炼和重去平——对残余的恒定相位和解缠后还存在的相位坡道进行估算并去除；④地面沉降估算——经过两次反演计算形变速率和时间序列上的位移；⑤地理编码——进行坐标转换，得到地面沉降反演结果。

1.3 地理探测器

地理探测器以“如果某个自变量对某个因变量产生影响，则其在空间分布上应具有相似性”为基本假设，常用以探测数据的空间分异性及其驱动因子<sup>[37]</sup>。其中，因子探测器探测哪些因素对风险造成影响，使用因子解释力  $q$  定量评价不同因子的解释力；交互探测器探测因子间的交互作用强度并识别因子之间交互作用类型（非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立、非线性增强）。结合已有相关研究结论和武汉市实际，在建立地



理探测器模型时，共选取水文地质条件、地面荷载、地下空间开发、工程施工等 4 个方面共 12 个影响因素指标作为驱动因子（表 1）<sup>[38-40]</sup>。值得注意的是，本研究并未将地下水开采量纳入，这是由于武汉市地下水多为郊区农村开采且开采量极低（占全市供水量的 0.1%）。为了提高研究结果对城市规划的参考价值，选择规划编制单元作为地面沉降驱动因子分析单元<sup>[41]</sup>。基于地理探测器模型的“因子探测器”和“交互探测器”，以平均沉降速率为因变量 Y，以驱动因子为自变量，进行武汉市地面沉降驱动因子及驱动因子之间交互作用的定量识别和分析。

表 1 武汉市地面沉降驱动模型影响因素指标

Tab. 1 The Dominant Factors of Land Subsidence in Wuhan City

指标类型	指标	单位	潜在影响机制
水文地质 条件	距断裂带平均距离 (X <sub>1</sub> )	km	断层的上下盘滑动。
	碳酸盐岩带面积占比 (X <sub>2</sub> )	%	岩溶洞隙上的岩土体易产生变形。
	软土层平均厚度 (X <sub>3</sub> )	m	软土具有高孔隙性和高含水量，地基承载力较低。
	第四系平均厚度 (X <sub>4</sub> )	m	第四系沉积物多松散、多孔、软弱，可压缩性高。
	地下水平均埋深 (X <sub>5</sub> )	m	反映地下水水位是否容易受到干扰。
地面荷载	建筑密度 (X <sub>6</sub> )	-	建筑密集程度影响附加应力。
	容积率 (X <sub>7</sub> )	-	高层建筑对地基应力场和渗流场影响更大。
	道路密度 (X <sub>8</sub> )	km/km <sup>2</sup>	交通网络静荷载及动荷载带来扰动压实土层。
地下空间 开发	轨道交通线路密度 (X <sub>9</sub> )	km/km <sup>2</sup>	地铁运营改变隧道周围土体初始应力形态，使土层中水压发生变化。
	单位面积地下开发体积 (X <sub>10</sub> )	km <sup>3</sup> /km <sup>2</sup>	地下建筑物对地下水的流动产生拦阻作用，可造成地下水的动力场发生变化。
	不透水丰度增量 (X <sub>11</sub> )	-	施工时基坑开挖及降排水使地下水水位发生变化。
工程施工	单位面积地下开发体积增量 (X <sub>12</sub> )	km <sup>3</sup> /km <sup>2</sup>	施工时基坑开挖及降排水使地下水水位发生变化。

注：2012 年前武汉市无地铁线路开通，故 T1 时期指标不含轨道交通线路密度 (X<sub>9</sub>)；“-”代表无量纲。

## 1.4 研究数据

### 1.4.1 SAR 数据

选取覆盖研究区的两种 SAR 影像数据对武汉市地面沉降信息进行反演（图 1），包括 20 期覆盖范围为 40×70 km 的 ALOS-PALSAR 斜距单视复数数据和 25 期覆盖范围为 50×50 km 的 Radarsat-2 宽幅超精细单视复数产品，获取时间段分别为 2007-01-15—2011-03-13（T1 时期）和 2015-10-17—2019-01-29（T2 时期）。为了提高数据处理效率，以武汉市主城区对 SAR 影像进行裁剪。

### 1.4.2 其他数据

在进行 SBAS-InSAR 地面沉降反演时，选取 SRTM3 version 4 DEM 数据去除地形起伏的影响，并使用 56 个水准点测量数据（2016 年 3 月至 2018 年 9 月）对地面沉降反演结果

进行精度验证。历年水文地质调查数据、建筑调查数据和地下空间开发调查数据由武汉市测绘研究院提供，用于地面沉降器驱动模型中各项影响因素指标的计算。此外，从地理空间数据云（<http://www.gscloud.cn/>）下载了多个年份的 Landsat TM/OLI 影像，用于不透水丰度增量的计算<sup>[42]</sup>。

## 2 结果分析

### 2.1 地面沉降监测结果

#### 2.1.1 精度验证

由 Radarsat-2 数据集反演得到的相干点地面沉降速率残差平均值为 1.54 mm/year，且小于 2 mm/year 的相干点占 70%以上（图 2a），说明地面沉降反演模型的内部精度较高。通过与水准测量点同时期的水准测量结果进行比较发现，地面沉降速率的垂直向分量与实测地面沉降速率的平均误差为 3.31 mm/year（图 2b），说明了将 SBAS-InSAR 技术应用于武汉市地面沉降反演可获得相对可靠的精度。

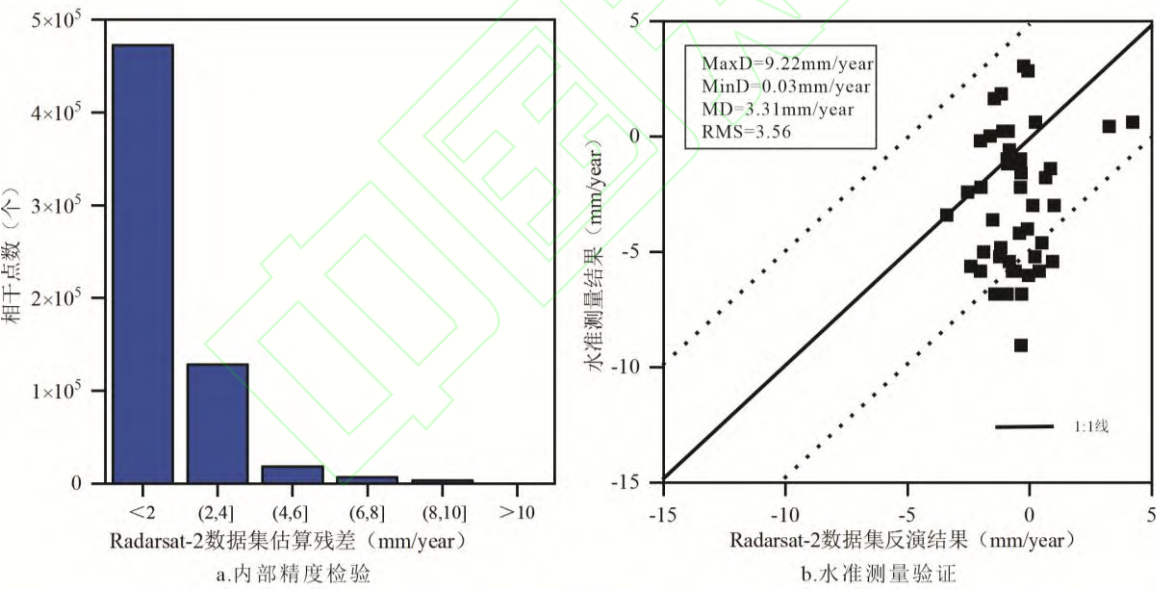


图 2 误差分布图

Fig. 2 Error Distribution Map

#### 2.1.2 地面沉降速率

由 SBAS-InSAR 反演得到 T1 时期 940551 个相干点视线向的地面沉降速率，平均值为 -3.53 mm/year，其中 74.46% 的相干点的沉降速率在在 -10 - 5 mm/year 之间；反演得到 T2 时期 529613 个相干点的地面沉降速率（视线向）平均值为 -1.48 mm/year，其中 99.77% 的相干点的沉降速率在 -10 - 5 mm/year 之间。总体来看，两个监测周期内武汉市均呈现出一定的沉降趋势，且 T1 时期武汉市的地面沉降平均速率更大。

如图 3a 所示，T1 时期，汉口、沙湖沿岸及以北、南湖以西和白沙洲是武汉市 4 个地面沉降较为显著的区域。汉口地区的沉降显著区域连成一片，分布面积最大，其中以后湖

（点 B）周边地面沉降最为严重；其次是沙湖沿岸及以北，沉降显著区域由沙湖连绵至长江天兴洲段南岸；白沙洲地区和南湖以西地区的沉降显著区域规模小于上述两个地区。T2 时期，汉口、沙湖北以及白沙洲的地面沉降最为显著（图 3b）。对比 T1 时期地面沉降速率发现，T2 时期汉口地区的沉降最为显著的区域转移至新荣村（点 H）周边，沙湖沿岸仅留有北部地区沉降较为显著，南湖以西地区地面沉降不再明显，而白沙洲以东地面沉降有加剧趋势。

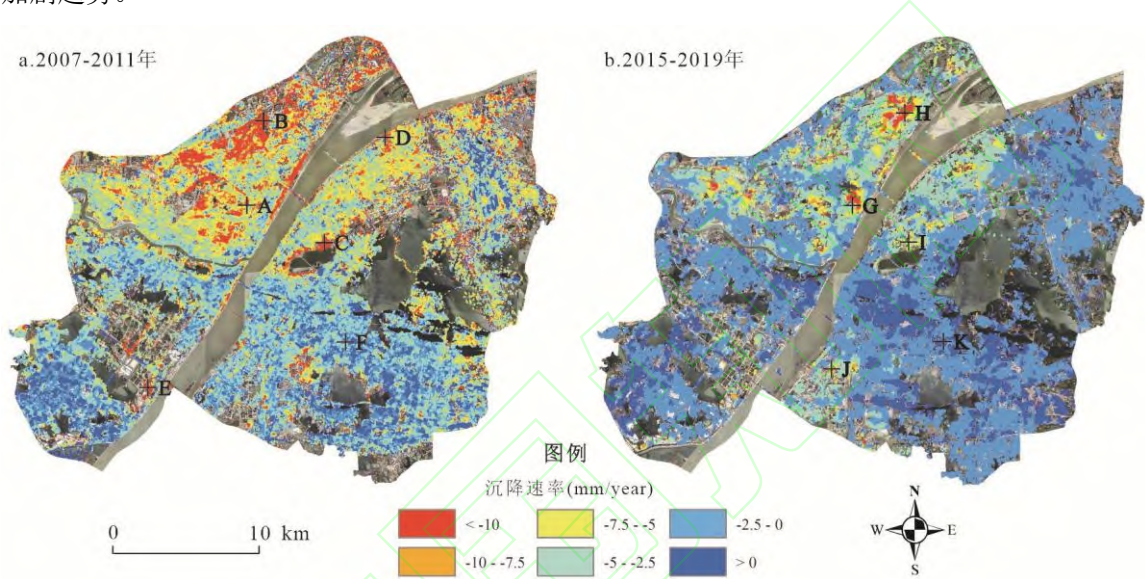


图 3 武汉市地面沉降速率分布图

Fig. 3 The Average Subsidence Velocity in the Line of Sight in Wuhan City

## 2.2 地面沉降时空演变

### 2.2.1 2007-2011 年地面沉降时间序列

如图 4a 所示，在监测周期内，汉口、沙湖沿岸及以北、南湖以西和白沙洲地区累积沉降量逐渐增加，沉降量较大（ $<-30$  mm/year）的区域分布范围不断扩展，累积沉降量最大的区域（后湖周边）逐渐凸显。沙湖北部的长江沿岸累积沉降量增加相对缓慢，总体的地面沉降累积量也较小。白沙洲地区、南湖以西地区在 2008 年 3 月 4 日之前的累积沉降量增加缓慢，而后才有明显的增长。分别在汉口地区、汉口后湖、沙湖沿岸、沙湖北和白沙洲地区设置 A、B、C、D、E 共 5 个样点（图 3a），F 为相对稳定的参考点，各点在监测周期内的累积沉降量变化如图 5a 所示。总体上来看，点 A、B、C、D、E 的累积沉降量呈不断增加的趋势，但在部分时间段经历了一定的抬升（图 5a）。点 A 和 D 起初累积沉降量变化不大，在 2009 年 10 月 23 日之后才出现较大幅度的沉降。点 B、C 和 E 在个别时间段内的累积沉降量变化特征也有所差异，如在 2009 年 10 月 23 日至 2010 年 1 月 23 日之间，点 B 和 C 累积沉降量增加量均超过了 10 mm，但 E 点并未发生明显沉降。

### 2.2.2 2015-2019 年地面沉降时间序列

在监测周期内，汉口、沙湖北和白沙洲地区 3 个较为明显的沉降中心逐渐形成（图 4b）。汉口地区的大部分累积沉降量逐渐增大。值得注意的是，位于汉口东北部的新荣村周边，其沉降量在监测初期增长缓慢，但在 2017 年 2 月 8 日之后快速增加，成为这一时期研究



区内地面沉降最为严重的地区。沙湖北地区和白沙洲地区的累积沉降量增加速度相对缓慢，总体的地面沉降累积量低于汉口地区。G、H、I、J（图 3b）分别是位于汉口地区、汉口新荣村、沙湖北和白沙洲地区的 4 个样点，K 为参考点。如图 5b 所示，点 G、I 和 J 的累积沉降量逐渐增加，且点 G 的累积沉降量大于点 I 和点 J。点 I 在前期沉降量增加较大，但在 2017 年 2 月 8 日之后沉降趋势变缓。点 H 的累积沉降量在 2016 年 9 月 17 日前变化较小，其后开始了经历一个明显增加的过程。

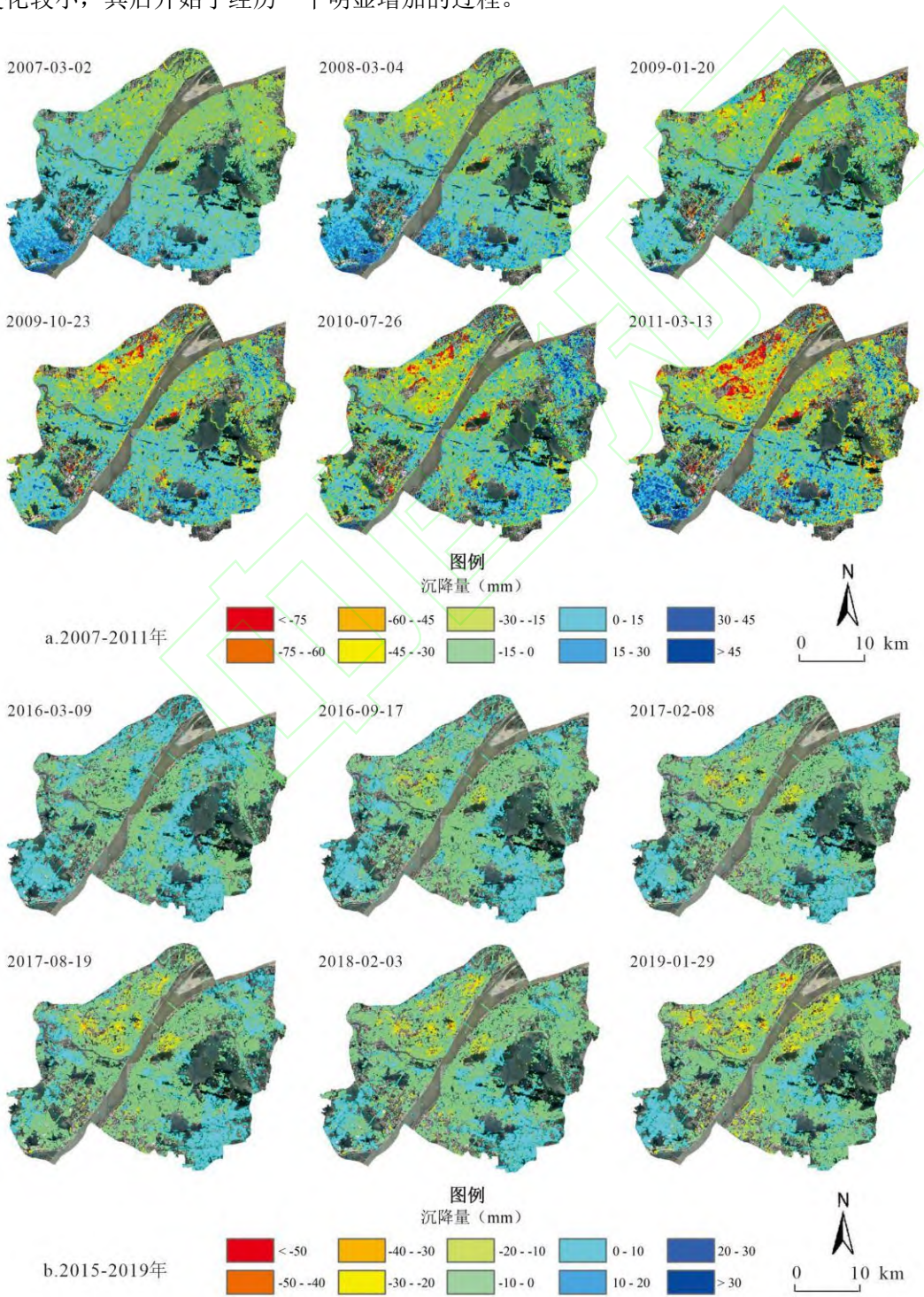




图4 武汉市地面沉降时间序列

Fig. 4 Spatio-temporal Evolution of Accumulated Subsidence in Wuhan City

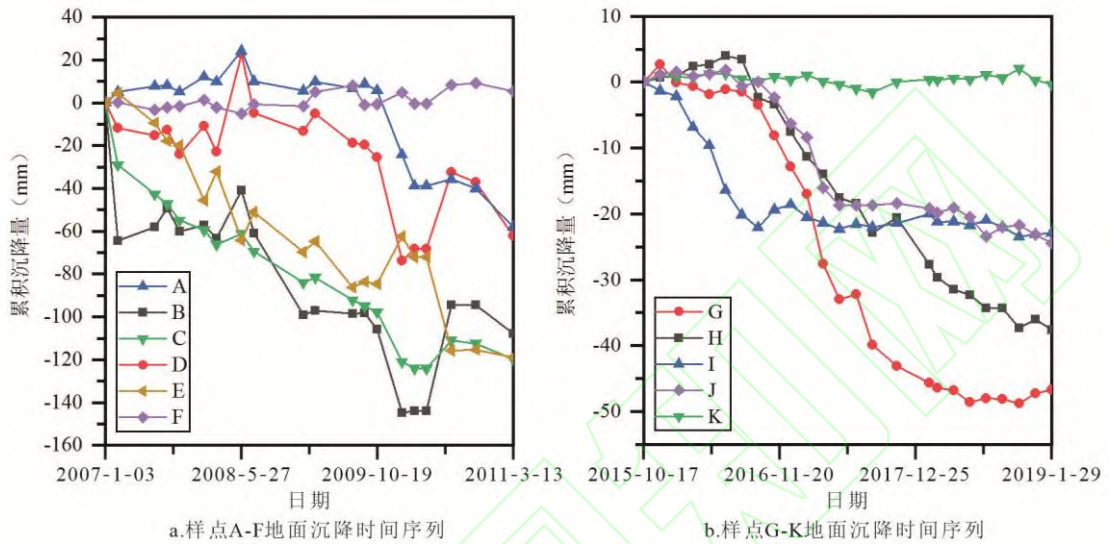


图5 样点地面沉降时间序列

Fig. 5 Accumulated Subsidence of the Typical Points

### 2.2.3 武汉市地面沉降演变特征

总结武汉市 2007-2011 年、2015-2019 年两个历史时期地面沉降发生发展情况，武汉市地面沉降演变具有三个特点：一是地面沉降空间分布的局部性，除了几个地面沉降显著区域外，大部分地区地面沉降趋势不明显，在主城区西南部和东南部甚至有地面抬升的趋势。二是地面沉降发生的阶段性，不同沉降中心在相同时间阶段沉降趋势有所不同，同一沉降中心在不同时间阶段沉降趋势同样各异。三是地面沉降与自然条件及人类活动的相关性，各沉降中心沉降的演变与区域自然条件和人类活动有关，如汉口地区分布有较厚的软土层，白沙洲地区位于碳酸盐岩带上，沙湖沿岸、南湖以西地区均有人工填湖历史，新荣村、后湖区域发生显著沉降期间周边有高强度的城市建设活动等。

### 2.3 地面沉降地理探测机制

在进行地理探测器探测武汉市地面沉降驱动因子时，需要对各规划编制单元 T1 时期和 T2 时期各驱动因子指标进行分级划分。本文使用自然断点分级法将各驱动因子指标分为 5 级（图 6）输入地理探测器模型。

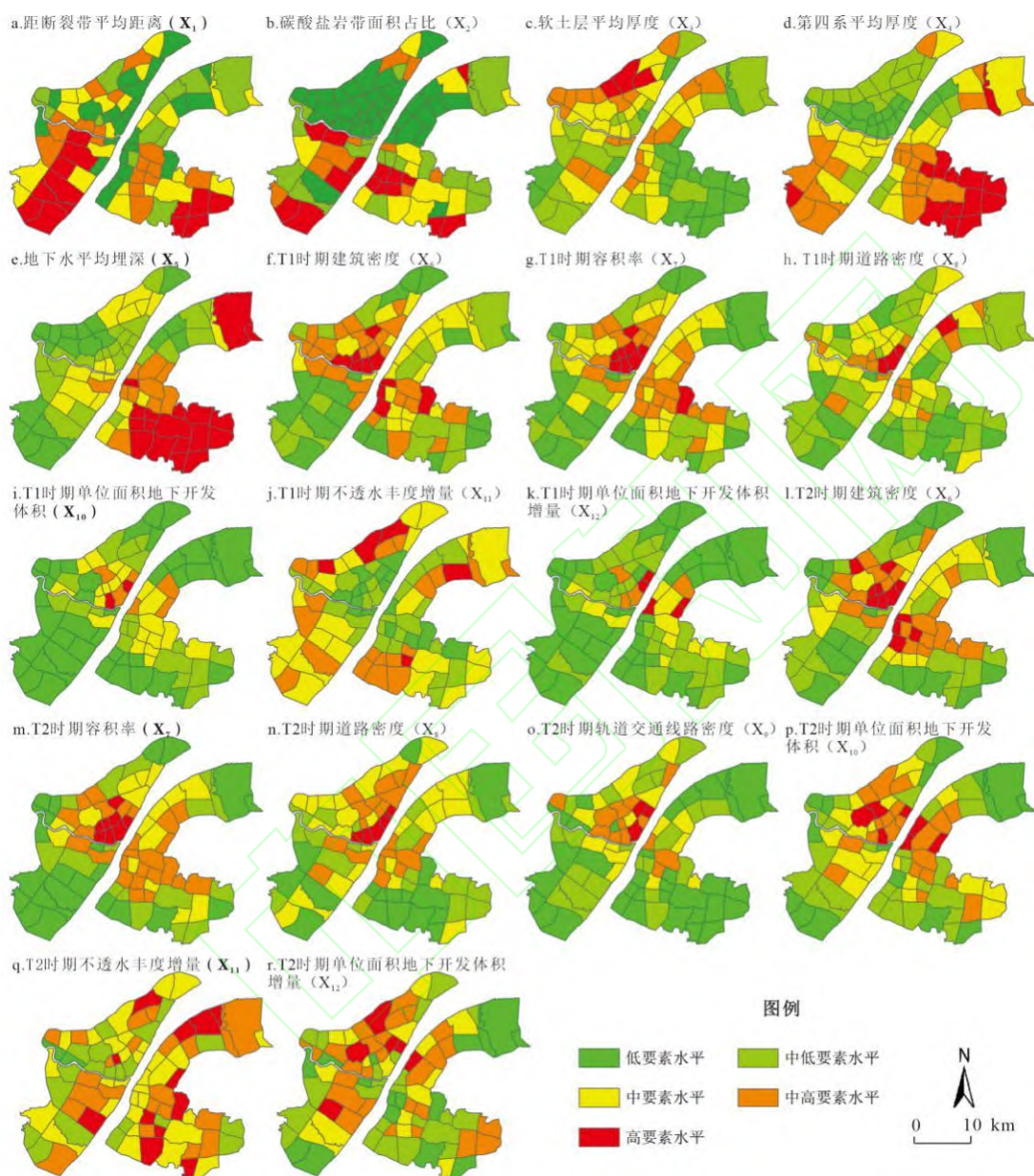


图 6 武汉市地面沉降驱动因子分级图

Fig. 6 The Classification of the Dominant Factors of Land Subsidence in Wuhan City

### 2.3.1 探测因子影响力

借助地理探测器“因子探测”模块得到武汉市两个时期地面沉降空间分异的各驱动因子的贡献率，并对比 12 个指标因子对武汉市地面沉降空间分异的相对重要性（表 2）。T1 时期各因子按照  $q$  统计量的大小排序为：第四系平均厚度>碳酸盐岩带面积占比>软土层平均厚度>地下水平均埋深>距断裂带平均距离>不透水丰度增量>容积率>单位面积地下开发体积>单位面积地下开发体积增量>道路密度>建筑密度。T2 时期各因子按照  $q$  统计量的大小排序为：第四系平均厚度>地下水平均埋深>碳酸盐岩带面积占比>软土层平均厚度>距断裂带平均距离>容积率>单位面积地下开发体积增量>轨道交通线路密度>道路密度>建筑密

度>单位面积地下开发体积>不透水丰度增量。两个时期水文地质条件因子（距断裂带平均距离、碳酸盐岩带面积占比、软土层平均厚度、第四系平均厚度、地下水平均埋深）对地面沉降空间分异贡献突出，q 统计量均排名前 5，其中第四系平均厚度对地面沉降的空间分异贡献率最大（q 统计量>40%）。同时，两个时期的工程施工（不透水丰度增量、单位面积地下开发体积增量）驱动因子解释力 q 值均为 15%左右，表明其对地面沉降空间分异起了一定的作用。此外，T2 时期地面荷载因子（容积率、建筑密度、道路密度）的总 q 统计量超过 30%，对该时期地面沉降空间分异作用较明显。

表 2 武汉市地面沉降空间分异驱动因子探测结果

Tab. 2 The Result of Factor Detector for the Spatial Differentiation of Land Subsidence in Wuhan City

因子指标	2007-2011 年			2015-2019 年		
	q 统计量	p 值	排序	q 统计量	p 值	排序
距断裂带平均距离 (X <sub>1</sub> )	0.1436	0.0266	5	0.1661	0.0086	5
碳酸盐岩带面积占比 (X <sub>2</sub> )	0.3834	0.0000	2	0.2451	0.0000	3
软土层平均厚度 (X <sub>3</sub> )	0.3123	0.0071	3	0.2043	0.0163	4
第四系平均厚度 (X <sub>4</sub> )	0.4489	0.0000	1	0.5726	0.0000	1
地下水平均埋深 (X <sub>5</sub> )	0.2359	0.0000	4	0.2924	0.0000	2
建筑密度 (X <sub>6</sub> )	0.0146	0.8810	11	0.0470	0.4632	10
容积率 (X <sub>7</sub> )	0.0751	0.2766	7	0.1351	0.1152	6
道路密度 (X <sub>8</sub> )	0.0336	0.7897	10	0.1154	0.1669	9
轨道交通线路密度 (X <sub>9</sub> )				0.1294	0.3025	8
单位面积地下开发体积 (X <sub>10</sub> )	0.0476	0.8619	8	0.0294	0.7523	11
不透水丰度增量 (X <sub>11</sub> )	0.1245	0.2732	6	0.0077	0.9745	12
单位面积地下开发体积增量 (X <sub>12</sub> )	0.0475	0.8593	9	0.1329	0.1030	7

2.3.2 探测因子交互作用

交互探测结果表明，两个时期所有驱动因子两两之间的交互 q 值都大于单个因子，因子互动效应为双因子增强和非线性增强，这说明武汉市地面沉降受水文地质条件、地面荷载、地下空间开发和工程施工等各方面影响因素的共同作用，任意两个因子相互作用都会增加地面沉降的可能性。

如表 3 所示，T1 时期，碳酸盐岩带面积占比和第四系平均厚度因子交互探测的 q 值最高，为 0.6999，对地面沉降空间分异的影响作用最强。交互程度对地面沉降空间分异作用的影响程度较高的还有：距断裂带平均距离∩碳酸盐岩带面积占比（q 值 0.6358）、碳酸盐岩带面积占比∩软土层平均厚度（q 值 0.6344）、碳酸盐岩带面积占比∩地下水平均埋深（q 值 0.6575）、第四系平均厚度∩地下水平均埋深（q 值 0.6223）、第四系平均厚度∩不透水丰度增量（q 值 0.6152）。值得注意的是，不透水丰度增量的因子影响力仅为 0.1245，但与碳酸盐岩带面积占比、第四系平均厚度、软土层平均厚度、地下水平均埋深等因子交互作用后，因子解释力之和均超过了 0.5，说明工程施工与水文地质条件构成了协同增强效应，共同影响了该时期地面沉降的空间分异。

如表 4 所示，T2 时期，第四系平均厚度与其他所有因子交互探测的 q 值均大于 0.6，其中碳酸盐岩带面积占比∩第四系平均厚度、第四系平均厚度∩地下水平均埋深因子交互探测的 q 值超过了 0.7，对地面沉降空间分异的影响作用最强。此外，交互程度对地面沉



降空间分异作用的影响程度达到 60% 以上的还有距断裂带平均距离∩碳酸盐岩带面积占比（q 值 0.6497）、地下水平均埋深∩容积率（0.6512）。地面荷载因子（建筑密度、容积率、道路密度）与水文地质条件（距断裂带平均距离、碳酸盐岩带面积占比、软土层平均厚度、第四系平均厚度、地下水平均埋深）的交互作用明显强于其他方面各因子之间的交互作用，反映了在该时期地面荷载与水文地质对地面沉降空间分异的共同作用较强。

表 3 2007-2011 年驱动交互作用探测

Tab. 3 Interaction Detection of Driving Factors of Land Subsidence from 2007-2011											
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>
X <sub>1</sub>	0.1436										
X <sub>2</sub>	0.6358	0.3834									
X <sub>3</sub>	0.5783	0.6344	0.3123								
X <sub>4</sub>	0.5916	0.6999	0.5534	0.4489							
X <sub>5</sub>	0.5193	0.6575	0.5173	0.6223	0.2359						
X <sub>6</sub>	0.3454	0.5571	0.5151	0.5468	0.4563	0.0146					
X <sub>7</sub>	0.3622	0.5371	0.4889	0.5762	0.4820	0.1493	0.0751				
X <sub>8</sub>	0.2963	0.4710	0.4990	0.5168	0.5324	0.2575	0.2639	0.0336			
X <sub>10</sub>	0.2625	0.4529	0.4191	0.5249	0.3728	0.1856	0.1724	0.2847	0.0476		
X <sub>11</sub>	0.3877	0.5867	0.5329	0.6152	0.5486	0.2500	0.4757	0.3272	0.4119	0.1245	
X <sub>12</sub>	0.3395	0.4418	0.4313	0.5182	0.3334	0.2418	0.2104	0.1750	0.1153	0.3247	0.0475

表 4 2015-2019 年驱动交互作用探测

Tab. 4 Interaction Detection of Driving Factors of Land Subsidence from 2015-2019												
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>
X <sub>1</sub>	0.1661											
X <sub>2</sub>	0.5039	0.2451										
X <sub>3</sub>	0.5568	0.4337	0.2043									
X <sub>4</sub>	0.6497	0.7313	0.6137	0.5726								
X <sub>5</sub>	0.5033	0.4821	0.5274	0.6441	0.2924							
X <sub>6</sub>	0.3125	0.4186	0.3955	0.6782	0.4816	0.0470						
X <sub>7</sub>	0.4397	0.5088	0.3839	0.7228	0.6512	0.2264	0.1351					
X <sub>8</sub>	0.3583	0.3881	0.3795	0.6714	0.4569	0.3854	0.4605	0.1154				
X <sub>9</sub>	0.4037	0.4634	0.4097	0.6732	0.4498	0.3085	0.3707	0.2394	0.1294			
X <sub>10</sub>	0.3438	0.3733	0.3540	0.6425	0.4468	0.2731	0.3429	0.2279	0.3054	0.0294		
X <sub>11</sub>	0.3133	0.3673	0.3237	0.6980	0.4063	0.2481	0.2482	0.2609	0.3471	0.1646	0.0077	
X <sub>12</sub>	0.4484	0.3442	0.4563	0.6197	0.4448	0.3078	0.3987	0.2868	0.4313	0.2637	0.2467	0.1329

2.3.3 武汉市地面沉降形成机制

地面沉降的发生是土体压缩的表现，存在含水砂层是其发生的必要条件，且与粘性软土层发育有关<sup>[43]</sup>。第四系厚度和软土层厚度大的地区发育有软土夹砂层，在一定程度上反映了土体的可压缩性，而在岩溶地区位于岩溶洞隙之上的岩土体在一定的条件下也容易产生变形破坏<sup>[44,45]</sup>。地下水埋深与含水层孔隙水压力有关，而含水层孔隙水压力决定着对荷载的支撑能力<sup>[46]</sup>。断层的上下盘滑动及断层两侧地下水运动特征的差异，也可能直接或者

间接带来地面沉降<sup>[47]</sup>。因子探测器探测结果中水文地质条件方面的影响因素指标的  $q$  值总体高于其他方面的影响因素指标,验证了水文地质条件在武汉市地面沉降的形成中的重要基础作用。在城市工程施工基坑降排水工作期间,地下水水位会发生临时性的变化,在岩溶地区和软土层发育地区可引发岩溶坍塌、软土层的压缩,进而引起地面沉降<sup>[20]</sup>。在 T1 时期,工程施工与地质构造背景、地下水状况构成了协同增强效应,是造成该时期地面沉降的重要因素。此外,建筑物、交通网络的静荷载和交通网络动荷载带来的对土体的扰动,也会加速地面沉降的进程。在 T2 时期,地面荷载因素通过与水文地质条件等因素的交互作用,对地面沉降的空间分异影响很大。两个时期中,已有的地下空间开发对地面沉降的影响相对较弱,但在 T2 时期轨道交通的运营期可能破坏了隧道周围土体初始应力形态,使轨道交通线路密度与其他因子一起,对该时期地面沉降空间分异造成影响。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本文以武汉市主城区为研究区,基于 2007-2011 年 ALOS-PALSAR 影像和 2015-2019 年的 Radarsat-2 影像,利用 SBAS-InSAR 技术获取两个监测阶段的地面沉降速率、沉降时间序列,并以规划编制单元为分析单元,利用地理探测器定量识别地面沉降的主导因子及其之间的交互作用,得到如下结论:

(1)由 SBAS-InSAR 技术反演得到 2007-2011 年和 2015-2019 年平均地面沉降速率(视线向)分别为  $-3.53 \text{ mm/year}$  和  $-1.48 \text{ mm/year}$ 。2007-2011 年地面沉降较为显著的 4 个区域是汉口、沙湖沿岸及以北、南湖以西和白沙洲地区。2015-2019 年为汉口、沙湖北以及白沙洲地区。

(2)武汉市地面沉降时空演变具有局部性、阶段性、与自然条件及人类活动具有相关性等特点。总体来看,主城区范围内仅局部区域有显著的地面沉降,各沉降中心在不同时间阶段沉降发展趋势各异,各沉降中心沉降的演变与区域自然条件和人类活动密切相关。

(3)水文地质条件对武汉市地面沉降空间分异的解释能力最强,是决定地面沉降空间分异的基础,通过与地面荷载、地下空间开发、工程施工等多方面因素交互作用形成武汉市地面沉降时空格局。其中,2007-2011 年工程施工因素、2015-2019 年的地面荷载因素与水文地质条件交互作用较强。

#### 3.2 讨论

准确监测地面沉降的发生发展特征,分析其演变规律,识别其驱动机制对于城市地面沉降的控制和综合预防具有重要基础作用。本文构建的地面沉降监测发现、过程演变、驱动机制研究框架可以为相关研究提供一定的参考,研究结论可为城市地面沉降防治提供科学依据。然而,2012-2014 年 SAR 影像的缺失影响了地面沉降监测的连续性,仅在规划编制单元单一尺度上进行地面沉降驱动机制研究也忽视了地理现象的尺度效应。未来应开展持续性更长的地面沉降监测以及多尺度的地面沉降形成机制研究,以进一步丰富地面沉降研究的理论和方法体系。

## 参考文献

- [1] Claudia Z, Minderhoud P, Pietro T. The role of sedimentation and natural compaction in a prograding delta: insights from the mega Mekong delta, Vietnam[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1):11437
- [2] Giuseppe, Gambolati, Pietro, et al. Geomechanics of subsurface water withdrawal and injection[J]. Water Resources Research, 2015, 51(6):3922-3955
- [3] Wang Xiaying, Zhang Qin, Zhao Chaoying, et al. A Novel Method of Generating Deformation Time-Series Using Interferometric Synthetic Aperture Radar and Its Application in Mexico City[J]. Remote Sensing, 2018, 10(11)
- [4] G. Herrera-Garcia, Pablo Ezquerro, Roberto Romas, et al. Mapping the global threat of land subsidence[J]. Science, 2021, 371(6524): 34-36
- [5] Pratesi F, Tapete D, Ventisette C D, et al. Mapping interactions between geology, subsurface resource exploitation and urban development in transforming cities using InSAR Persistent Scatterers: Two decades of change in Florence, Italy[J]. Applied Geography, 2016, 77: 20-37
- [6] Da Ng V K, Doubre C, Weber C, et al. Recent land subsidence caused by the rapid urban development in the Hanoi region (Vietnam) using ALOS InSAR data[J]. Natural Hazards & Earth System sciences, 2013, 1(6):6155-6197
- [7] Tong Dingzhao, Wu Kai, Yao Chengwei, et al. Water resources and environmental problems brought about in developing and using them in the jing-jin-bo area[J]. Geographical Research, 1985, 4(4): 31-38(童鼎钊, 吴凯, 姚承伟, 等. 京津渤地区的水资源及开发利用中的环境问题[J]. 地理研究, 1985, 4(4): 31-38)
- [8] Qu Feifei, Zhang Qin, Lu Zhong, et al. Land subsidence and ground fissures in Xi'an, China 2005–2012 revealed by multi-band InSAR time-series analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 155:366-376
- [9] Hu R L, Yue Z, Q Wang L C, et al. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China[J]. Engineering Geology, 2004, 76(1-2):65-77
- [10] Zhang Yonghong, Wu Hongan, Kang Yonghui, et al. Ground Subsidence in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1992 to 2014 Revealed by Multiple SAR Stacks[J]. Remote Sensing, 2016, 8(8):675-
- [11] Qin Y, Perissin D. Monitoring Ground Subsidence in Hong Kong via Spaceborne Radar: Experiments and Validation[J]. Remote Sensing, 2015, 7(8):10715-10736
- [12] Ora B, Ag C, Tb D, et al. Land subsidence hazard modeling: Machine learning to identify predictors and the role of human activities - ScienceDirect[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 236:466-480
- [13] Xie Ping, Zhang Shuangxi, Ning Jinsheng, et al. Detection of the Urban Surface Deformation and New Strategy for Flood Prevention in Wuhan Central District[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 08-11: 1-10(谢萍, 张双喜, 宁津生, 等. 武汉市中心城区地表形变与洪涝灾害防治新策略. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 08-11: 1-10)
- [14] Yang Di. China's response to land subsidence[J]. China Newsweek, 2012, 000(042):18-20(杨迪. 地面沉降的中国应对[J]. 中国新闻周刊, 2012, 000(042):18-20)
- [15] Pu Chuanhao, Xu Qiang, Zhao Kuanyao. Land Uplift Monitoring and Analysis in Yan'an New District Based on SBAS-In SAR Technology [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(7): 983-993(蒲川豪, 许强, 赵宽耀,等. 利用小基线集 InSAR 技术的延安新区地面抬升监测与分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2021, 46(7): 983-993)
- [16] Fuhrmann T, Garthwaite M C. Resolving Three-Dimensional Surface Motion with InSAR: Constraints from Multi-Geometry Data Fusion[J]. Remote Sensing, 2019, 11(3)
- [17] 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(许强, 蒲川豪, 赵宽耀,等. 延安新区地面沉降时空演化特征时序 InSAR 监测与分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2020, 46(7): 957-969)
- [18] 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(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), 2021, 44(7):1099-1106)
- [19] Riccardo, Lanari, Francesco, et al. An Overview of the Small BASeline Subset Algorithm: a DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis[J]. Pure&applied geophysics, 2007. 164(4) 637–661
- [20] Zhou Lv, Guo Jiming, Hu Jiyuan, et al. Wuhan Surface Subsidence Analysis in 2015–2016 Based on Sentinel-1A Data by SBAS-InSAR[J]. Remote Sensing, 2017, 9(10)
- [21] Yan Dapeng, Ge Daqing, Yang Jin, et al. PSI analyses of land subsidence due to economic development near the city of Hangzhou, China[C]// Geoscience & Remote Sensing Symposium. IEEE, 2010



- [22] Poland J F, Davis G H. Subsidence of the land surface in the Tulare - Wasco (Delano) and Los Banos - Kettleman City area, San Joaquin Valley, California[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*. 1956, 37(3): 287
- [23] Zhang Zhengjia, Wang Chao, Wang Mengmeng, et al. Surface deformation monitoring in Zhengzhou City from 2014 to 2016 Using Time-Series InSAR[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11).
- [24] Sarychikhina O, Glowacka E, Suarez-Vidal F, et al. DInSAR analysis of land subsidence caused by geothermal fluid exploitation in the Mexicali Valley, B.C. Mexico[C]// *Eight International Symposium on Land Subsidence*. 2010.
- [25] Yuan Yue, Jia Liyun, Zhang Xujiao, et al. Land subsidence monitoring and mechanism analysis in haikou based on SBAS-InSAR technology[J]. *Geography and geo-information science*, 2020,36(05):56-64(袁悦,贾丽云,张绪教,等.基于 SBAS-InSAR 技术的海口地区地面沉降监测及机理分析[J].*地理与地理信息科学*,2020,36(05):56-64)
- [26] Huang Jianmin, Zheng Xiaozhan, Hu Rangquan, et al. A Study of Warning and Forecasting of Karst Collapse Geological Disaster in Jinshazhou of Guangzhou[J]. *Geoscience*, 2017, 31(2):421-432(黄健民, 郑小战, 胡让全,等. 广州金沙洲岩溶地面塌陷灾害预警预报研究[J]. *现代地质*, 2017, 31(2):421-432)
- [27] Xia Yuanping, Chen Zhixuan, Zhang Yi. InSAR monitoring of land subsidence in nanchang city and its influencing factors analysis[J]. *Science of surveying and mapping*, 2020, 45(11):119-126+133(夏元平、陈志轩、张毅. 南昌市地面沉降 InSAR 监测及影响因子分析[J]. *测绘科学*, 2020, 45(11):119-126+133)
- [28] Xu Bing, Feng Guangcai, Li Zhiwei, et al. Coastal Subsidence Monitoring Associated with Land Reclamation Using the Point Target Based SBAS-InSAR Method: A Case Study of Shenzhen, China. *Remote Sensing*. 2016, 8, 652.
- [29] Shi Yishao, Shi Donghui, Cao Xiangyang. Impacting Factors and Temporal and Spatial Differentiation of Land Subsidence in Shanghai[J]. *Sustainability*, 2018, 10(9)
- [30] Amighpey M, Arabi S. Studying land subsidence in Yazd province, Iran, by integration of InSAR and levelling measurements[J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2016: S2352938516300209
- [31] Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering, *Blue Book on the Development of Urban underground Space in China*. 2019: 1-10(中国岩石力学与工程学会. 中国城市地下空间发展蓝皮书(2019))
- [32] Wuhan Institute of Surveying and Mapping. *Wuhan Urban geology*. Beijing: China Geology Press, 2018: 1-10(武汉测绘研究院. 武汉城市地质[M]. 中国地质大学出版社, 2018)
- [33] Luo Xiaojie. On the history of tectonic evolution and karstification in Wuhan[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(2):195-202(罗小杰. 试论武汉地区构造演化与岩溶发育史[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(2):195-202)
- [34] Luo Xiaojie. Division of "Six Belts and Five Types" of carbonate region and control of karst geological disaster in Wuhan[J]. *Journal of hydraulic engineering*, 2014, 45(002):171-179(罗小杰. 武汉地区碳酸盐岩"六带五型"划分与岩溶地质灾害防治[J]. *水利学报*, 2014, 45(002):171-179)
- [35] Qu Ruofeng, Xu Guangli, Wang Jinfeng, et al. Correlations of physical and mechanical properties of typical soft soils in Wuhan[J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2014, 36(zk2):113-121(屈若枫, 徐光黎, 王金峰, 等. 武汉地区典型软土物理力学指标间的相关性研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(zk2):113-121)
- [36] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2002, 40(11):2375-2383
- [37] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(001):116-134(王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(001):116-134)
- [38] Zhou Aihong, Wang Chenhui, Li Shaokang . Influencing factors analysis of urban land subsidence[C]// *International Conference on Machinery*. 2016.
- [39] Wan Weifeng, Zhang Juanjuan, Li Yunfeng. et al. The Cause and Characteristics of Land Subsidence in Xi'an, China[C]// *ICEEE 2011 International conference on electrical and electronics engineering*
- [40] Zhang Yang. *Spatial-temporal Patterns, Driving Forces and Hydrological Effects of Land Subsidence: A Case Study of Wuhan City, China*[D]. Wuhan University, 2019(张扬. 武汉市地面沉降时空格局、驱动因子及水文效应研究[D].武汉大学,2019)
- [41] Lou Xiangqiang, Hou Quanhua. The Research on Aggregate Analysis of the Regulatory Detailed Planning by considering the Traffic Capacity[J]. *International Journal of Cognitive Informatics & Natural Intelligence*, 2015, 9(1):1-15
- [42] Zhang Yang, Liu Yanfang, Liu Yi. Spatial and temporal patterns analysis of impervious surface in Wuhan city[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, v.37(12):136-143(张扬, 刘艳芳, 刘以. 武汉市不透水地表时空格局分析[J]. *地理科学*, 2017, v.37(12):136-143)
- [43] Pascal, Castellazzi, Jaime, et al. InSAR to support sustainable urbanization over compacting aquifers: The case of Toluca Valley, Mexico[J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2017

- [44] Huang Jianmin, Zheng Xiaozhan, Hu Rangquan, et al. A Study of Warning and Forecasting of Karst Collapse Geological Disaster in Jinshazhou of Guangzhou[J]. Geoscience, 2017, 31(2):421-432(黄健民, 郑小战, 胡让全,等. 广州金沙洲岩溶地面塌陷灾害预警预报研究[J]. 现代地质, 2017, 31(2):421-432)
- [45] Bai Lin, Jiang Liming, Wang Hansheng, et al. Spatiotemporal Characterization of Land Subsidence and Uplift (2009–2010) over Wuhan in Central China Revealed by TerraSAR-X InSAR Analysis[J]. Remote Sensing, 2016, 8, 350
- [46] Cao Wenbing. Water release from clayey soil in pore confined water bearing system and its significance in resource evaluation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1983(04):12-17(曹文炳. 孔隙承压含水系统中粘性土释水及其在资源评价中的意义[J]. 水文地质工程地质, 1983(04):12-17)
- [47] Chen Beibei. Analysis on evolution process and Mechanism of land subsidence in typical areas of Beijing. Beijing: China Environment Press, 2015: 1-10(陈蓓蓓. 北京市典型地区地面沉降演化过程与机理分析[M]. 北京: 中国环境出版社, 2015)

# Spatial-temporal variation characteristics and geographic detection mechanism of land subsidence in Wuhan city from 2007 to 2019

ZHANG Yang<sup>1,2</sup>, LIU Yanfang<sup>3</sup>, LIU Ying<sup>4</sup>, LIU Yaolin<sup>3</sup>, CHEN Yulu<sup>5</sup>, WANG Zhengyu<sup>3</sup>

1 College of Tourism and Urban-Rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059;

2. Research Center for Human Geography of Tibetan Plateau and Its Eastern Slope, Chengdu 610059;

3. School of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079;

4. Wuhan Institute of Surveying and Mapping, Wuhan 430022;

5. Chengdu Economic Development Academy, Chengdu 610032

**Abstract:** **Objectives:** Land subsidence in urban areas brings loss of ground elevation, damages urban infrastructure and buildings, and affects surface runoff and hydrological cycle. Monitoring the status of land subsidence and revealing its formation mechanism is of great significance for sustainable urban development.

**Methods:** Using ALOS-PALSAR images from 2007 to 2011 and Radarsat-2 images from 2015 to 2019 as data sources, based on SBAS-InSAR technology to obtain the land subsidence rate and time series, and using geographic detectors to reveal the dominant driving factors and the interaction mechanism between the driving factors of land subsidence at the scale of planning unit. **Results:** The results show that: ①The average land subsidence rates from 2007 to 2011 and 2015 to 2019 were -3.53 mm/year and -1.48 mm/year, respectively. The hot spots for land subsidence from 2007 to 2011 are Hankou, the coast and north of Shahu Lake, the west of Nanhu Lake, and the Baishazhou area. From 2015 to 2019, it is Hankou, the north of Shahu Lake and the Baishazhou area. ②The temporal and spatial evolution of land subsidence in Wuhan is localized, staged, and related to natural conditions and human activities. Rapid subsidence only occur in certain region, shows the different trends at various stages, and is closely related to the regional natural conditions and human activities.

③Hydrogeological conditions are necessary conditions to form the spatial-temporal pattern of land subsidence in Wuhan through interaction with various factors such as ground load, underground space development, and engineering construction. The interactive effects between engineering construction and hydrogeological conditions from 2007 to 2011 are found to be significant, so do ground load and hydrogeological conditions from 2015 to 2019. **Conclusion:** The geographic detector can quantitatively identify the driving factors of land subsidence and the interactions between them. The interactive effects between hydrogeological and conditions engineering construction, ground load to a large extent affected spatial variation of land subsidence from 2007 to 2011 and 2015 to 2019 respectively. In the future, continuous monitoring of land subsidence and multi-scale research on the formation mechanism of land subsidence should be carried out to further enrich the theory and method system of land subsidence research.

**Keywords:** Land subsidence; Small baseline subset interferometric synthetic aperture radar; spatio-temporal variation; geographic detector; Wuhan city

**First & corresponding author:** ZHANG Yang, associate research fellow, specializes in urban remote sensing. Email: zhangyang2020@cdut.edu.cn

**Foundation support:** Start-up Grant of Chengdu University of Technology (10912-KYQD2020-08419).



## 网络首发:

**标题:** 2007-2019年武汉市地面沉降时空分异特征及地理探测机制

**作者:** 张扬,刘艳芳,刘莹,刘耀林,陈雨露,王征禹

**收稿日期:** 2021-03-22

**DOI:** 10.13203/j.whugis20210143

## 引用格式:

张扬,刘艳芳,刘莹,等. 2007-2019年武汉市地面沉降时空分异特征及地理探测机制[J].武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210143 (ZHANG Yang, LIU Yanfang, LIU Ying, et al. Spatial-temporal variation characteristics and geographic detection mechanism of land subsidence in Wuhan city from 2007 to 2019 [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210143)

**网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!**

---

## 您感兴趣的其他相关论文:

### 延安新区地面沉降时空演化特征时序 InSAR 监测与分析

许强, 蒲川豪, 赵宽耀, 等.

武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(7): 957-969

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200146>

### 利用 InSAR 与地质数据综合分析南京河西地面沉降的演化特征和成因

朱邦彦, 姚冯宇, 孙静雯, 等.

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(3): 442-450

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190081>