

杨辰, 邓飞, 史绪国. 利用 2015-2019 年 Sentinel-1 数据监测武汉白沙洲岩溶区地表沉降特征[J]. 中国岩溶, 2023, 42(3): 558-564.
DOI: 10.11932/karst2023y018

利用 2015-2019 年 Sentinel-1 数据监测武汉白沙洲 岩溶区地表沉降特征

杨 辰¹, 邓 飞², 史绪国³

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 广东省佛山地质局, 广东 佛山 528000; 3. 中国地质大学地理与信息工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 武汉市白沙洲地区覆盖型岩溶分布广, 地质条件十分复杂, 历史上多次发生岩溶塌陷, 地质问题突出, 需要利用有效手段监测区域性地面塌陷, 及时发现隐患。文章利用时序 InSAR 技术对覆盖 2015 年 4 月至 2019 年 9 月升轨 Sentinel-1 数据集分析, 获取了武汉白沙洲地区地面沉降分布情况, 最大年平均变形速率达 $30 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。对典型沉降中心的时序变形分析表明, 白沙洲地区的岩溶区地面沉降与季节性降雨密切相关, 且有一定的滞后。同时, 对武汉地铁 6 号线车辆段的分析发现, 日益加剧的人类活动引起严重的地面沉降, 因此需密切注意周围建筑与基础设施的安全问题。本文的实验证明了时序 InSAR 方法在地表变形监测中的有效性, 可在岩溶区地质灾害防治发挥重要作用。

关键词: 岩溶区; 地表沉降; 时序 InSAR; 降雨

中图分类号: P642.2; U231.94 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2023) 03-0558-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

我国岩溶区面积约 346 万 km^2 , 超过国土面积的三分之一^[1], 是世界上岩溶分布最广的国家之一。西南岩溶区包括贵州、云南、广西、四川、重庆、湖南、湖北、广东八省(区、市)^[2], 是我国的典型岩溶区。该区气候温暖湿润、降雨量大, 是地质灾害的高发区域。2019 年全国共发生地质灾害 6 181 起, 比 2018 年 2 966 起增加 108.4%^[3], 共造成死亡失踪 224 人, 其中重庆、四川、贵州和云南四省市岩溶山区就高达 98 人, 造成直接经济损失 17 亿元, 占全国地质灾害直接经济损失的 61.4%^[4]。

我国有很多城市位于岩溶区, 如贵阳、桂林、武

汉、深圳、广州等。根据统计, 我国有 30 多个大中城市、420 个县市处于地面塌陷高风险区^[5]。地下岩溶发育、丰富的岩溶地下水和一定的土层厚度是城市发生地面塌陷、地面形变等地质灾害的最主要因素之一^[6]。

武汉市内大面积分布覆盖型岩溶, 地质条件十分复杂, 总体呈 NWW-SEE 向分布, 数条岩溶条带横跨长江, 岩溶区岩溶环境地质问题突出, 岩溶地质灾害造成了巨大的经济损失, 根据调查数据统计, 从 1994 年至今发生岩溶塌陷 40 余次(处), 随着城区的不断扩展, 人类工程活动的加剧, 地质灾害的发生频率呈逐年增高的趋势^[7-9]。

岩溶区地表形变监测的技术有地质雷达探测技

资助项目: 中国地质调查项目(DD20190432, DD20190343)

第一作者简介: 杨辰(1989—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 岩溶地质信息化、岩溶区地质灾害识别与监测。E-mail: ychen@mail.cgs.gov.cn。

收稿日期: 2022-07-05

术、岩溶管道系统中水压力动态变化传感器自动监测技术、精密水准测量监测技术、GPS 监测技术和合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 等^[7]。近年来, InSAR 作为一种大范围高精度的变形监测手段得到广泛应用, 相较于其他的传统监测手段具有全天候、全天时、空间覆盖范围广、不受天气影响和精度高等优势^[10]。研究者们利用 InSAR 技术对覆盖武汉地区的不同时间段的 TerraSAR-X^[11-12]、COSMO-SkyMed^[13-14]、Sentinel-1^[15] 和 Radarsat-2^[16] 等合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 数据进行时序分析, 获取了武汉地面沉降, 发现沉降主要集中在人类活动较多的软土区和岩溶区。

本文采用时序 InSAR 分析技术对 2015-2019 年 Sentinel-1 数据对武汉白沙洲岩溶地面高发区进行地表形变监测, 对典型变形点进行时序变形和影响因素分析, 验证雷达干涉测量技术的有效性。

1 时序 InSAR 分析方法

合成孔径雷达通过向地面目标主动发射电磁波并接收回波信号, 记录在复数数据中。复数数据中包括幅度和相位两部分信息, 其中幅度信息反映了回波信号的强弱, 相位信息记录了地面目标与传感器之间距离。因此, 可以通过充分利用相位信息探测地表的微小形变。InSAR 技术主要通过不同时间获取的覆盖同一地区的两幅 SAR 单视复数影像进行共轭相乘获取干涉图, 干涉图中的每个像素的相位可以表示为:

$$\phi = \phi_{flat} + \phi_{topo} + \phi_{def} + \phi_{orb} + \phi_{atm} + \phi_n \quad (1)$$

式中: ϕ 为缠绕相位, 包含椭球相位 ϕ_{flat} , 地形相位 ϕ_{topo} , 地表变形相位 ϕ_{def} 、轨道误差 ϕ_{orb} 、大气扰动 ϕ_{atm} 以及热噪声 ϕ_n 等相位分量。其中椭球相位可以通过和水平基线之间的关系进行模拟和移除, 地形相位可以通过参考数字地表模型 (Digital elevation model, DEM) 移除, 但是由于地形信息的不准确性, 相位中还残留有部分的 DEM 误差。由于 DEM 误差、大气以及时空去相干因素等的影响, InSAR 技术在形变监测方面的有效性和精度受限。

时序 InSAR 技术利用场景中的相位稳定性较高的永久散射体和一定时间内保持相干性的分布式散射体, 通过不同的相位分量在多时相 InSAR 数据不

同特性准确分离出变形分量, 突破了上述限制, 可以获取地表的高精度形变信息^[17-19]。本文对获取的时序 Sentinel-1 数据进行高精度配准和重采样后, 通过小基线数据集技术方式组合生成时间序列干涉图。进而利用振幅离差和相位稳定性分析的方法提取有效散射体进行相位解缠, 逐步分离相位中的各项分量。本文通过二次多项式的方法估计解缠干涉图中的轨道误差, 利用地形和垂直基线之间的线性关系获取 DEM 误差, 通过时空滤波的方式估计大气分布。在移除上述估计得到的分量之后, 通过奇异值分解的方式获取视线向地表变形数据, 并通过公式 (2) 转换至垂直方向。

2 实验区与数据简介

武汉位于江汉平原东部, 地势呈东高西低, 南高北低。长江及其最大支流汉江流经武汉, 并将武汉一分为三。武汉是国家重要的工业、科学和运输产业基地。随着 2004 年中部崛起政策的实施, 武汉经济和城市迅速发展。武汉城市年扩张速率达到了 46.75%, 城市面积也由 1988 年的 $4.19 \times 10^4 \text{ km}^2$ 扩张到 2011 年的 $49.29 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。同时武汉都市发展区 95% 的面积都是第四系松散层覆盖^[20], 因此城市建设过程中不可避免的出现了地面沉降等地质灾害。武汉市江岸区、硚口区和武昌区共有 40 个小区和单位发生了地面沉降等, 对建筑和基础设施造成了不同程度的伤害^[21]。

本文实验区位于东经 $114^\circ 12' 30'' \sim 114^\circ 18' 45''$, 北纬 $30^\circ 28' 0'' \sim 30^\circ 32' 24''$ (图 1), 实验区覆盖汉阳江堤和洲头街道、武昌白沙洲街道以及洪山张家湾和青菱街道, 地貌以冲湖积平原和剥蚀堆积岗为主, 河谷阶地发育。地表覆盖主要为第四系全新统松散堆积物, 岩性上部为黏性土, 下部为粉细砂^[22]。松散堆积物下伏可溶碳酸岩, 岩溶塌陷风险较高。图 1 中黑色圆圈给出了实验区历史岩溶塌陷位置分布, 集中分布在冲湖积平原区。由于人类活动加剧, 岩溶塌陷的也呈逐年高发趋势, 图 1 中给出了 1931 年至 2019 年间发生的 23 起岩溶塌陷位置^[23]。

作为哥白尼全球对地观测项目中的重要组成部分, Sentinel-1A/B 卫星分别于 2014 年 4 月 3 日和 2016 年 4 月 25 日发射升空, 以 IW (Interferometric Wide swath) 为主要工作模式, 距离向和方位向分辨

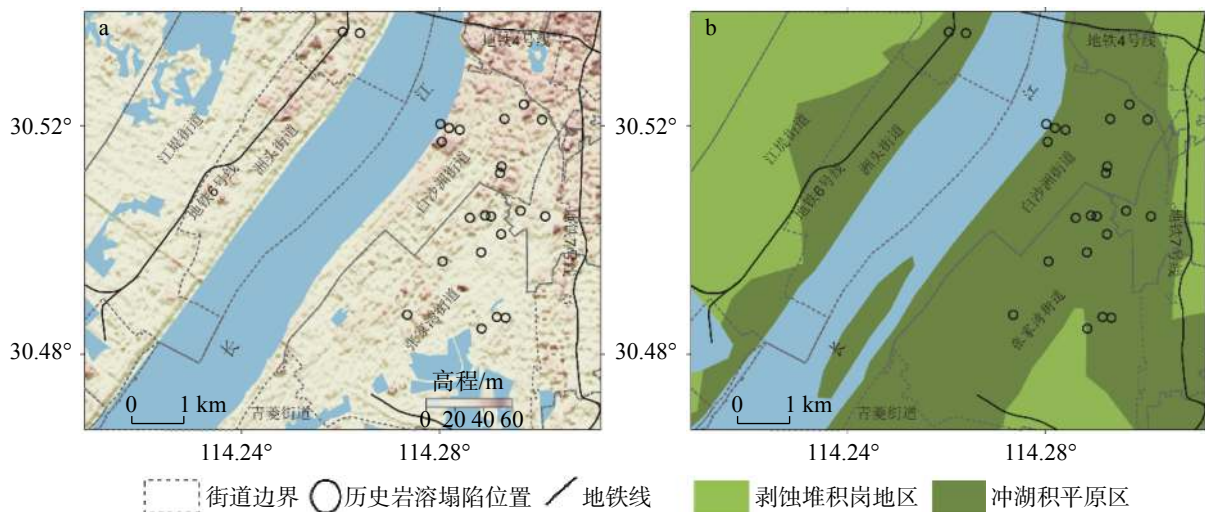


图1 实验区地貌分区

Fig. 1 Geomorphological zoning of the experimental area

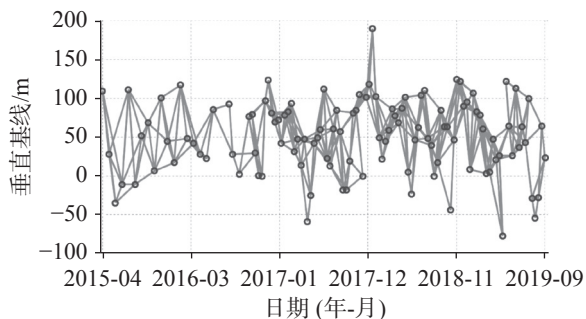


图2 Sentinel-1 干涉对组合

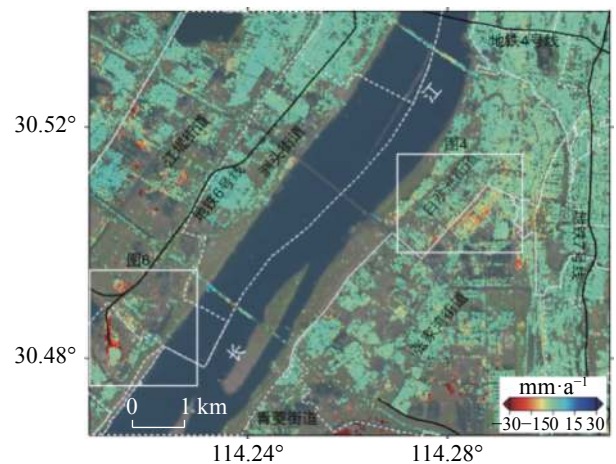
Fig. 2 Sentinel-1 interference pair combination

率分别为 5 m 和 20 m, 单星重访周期 12 天, 覆盖范围可达 250 km。本文获取了 2015 年 4 月至 2019 年 9 月的 113 景 Sentinel-1 升轨数据进行干涉处理, 数据干涉组合如图 2 所示。本文获取了日本宇宙航空研究开发机构 AW3D 30 m 数字地表模型进行差分干涉图生成和地理编码。同时获取了由中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>) 提供的武汉气象站日值降雨数据进行岩溶区变形影响因素分析。

3 实验结果与分析

3.1 实验区平均形变速率

图 3 中给出了利用 Sentinel-1 数据获取的平均形变速率图, 变形区域集中在冲湖积平原区。近年来, 武汉市对岩溶区的地下水抽取进行了控制^[22], 可以看到白沙洲街道和张家湾街道等历史岩溶塌陷高发区变形速率较小, 为 $10\sim 15\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。实验区沉降中

图3 利用 Sentinel-1 数据提取的实验区平均形变速率图
Fig. 3 Average deformation rate of experimental area extracted by Sentinel-1 data

心出现于地铁 6 号线车辆段以及青菱街道, 变形速率约为 $30\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 主要是由于近年来频繁的建筑活动导致。接下来本文将对图 3 中白色方框位置进行时序分析。

3.2 白沙洲地区岩溶区沉降与影响因素分析

图 4 中给出白沙洲和张家湾街道地表沉降分布, 底图为 2017 年 12 月 9 日获取的谷歌地球影像。根据之前研究^[12, 15], 此处的变形跟覆盖型岩溶引起的地质活动密切相关。本文探测到的变形区主要集中在白沙洲大道和夹套河路之间, 主要区域为烽火集团汽配城和烽火钢材市场等, 变形速率最大为 $15\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

岩溶塌陷的影响因素包括: 地下水位变化、长江水位变化、极端降雨天气以及人类活动影响等^[23-24]。

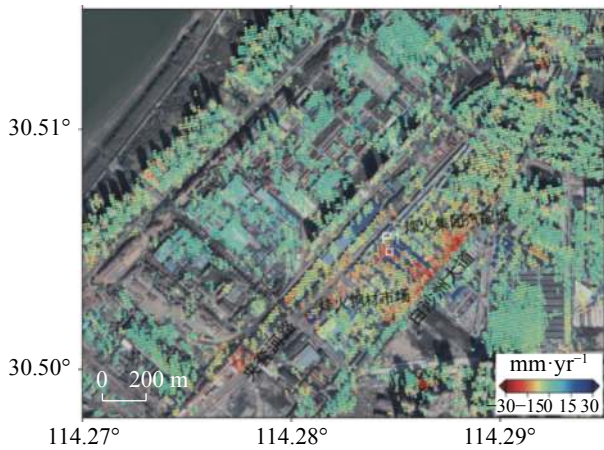


图 4 白沙洲岩溶区地面沉降速率图

Fig. 4 Land subsidence rate in the karst area of Baishazhou

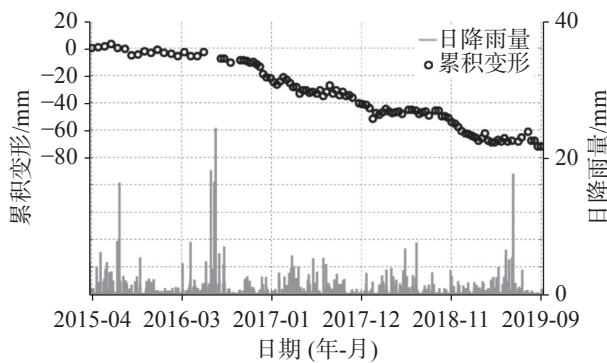


图 5 P1 点累积沉降与降雨

Fig. 5 Cumulative settlement and rainfall at P1

为了分析白沙洲地区岩溶塌陷变形特征,本文选取了 P1 点进行时序分析,并同时在图 5 中给出观测时间段内的降雨信息。图 5 中可以看到,2016 年以前 P1 点的沉降较小,但是 2016 年武汉暴雨之后,P1 点的沉降迅速加快。降雨通过渗入覆盖在岩溶区上的第四系松散堆积物,增加了上覆饱和层的自重,使得下方的岩溶土拱承受比平时更大的重量,导致地面发生沉降^[24-25]。随后 P1 点的变形呈现与降雨相关的季节性变化。2015 年 4 月至 2019 年 9 月期间,P1 点的累积沉降达到了接近 80 mm。

3.3 地铁 6 号线车辆段变形分析

图 6 底图为 2017 年 12 月 9 日获取的谷歌地球影像。由于本文数据观测期间,图 6 中的老关村地铁 6 号线车辆段一直在施工建设,因此造成了严重的地面沉降,最大变形速率 $30 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。同时,6 号线旁边的机车安全检测中心也出现约 $25 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的沉降(图 6)。图 7 中给出了 P2 点 2015 年 4 月至 2019

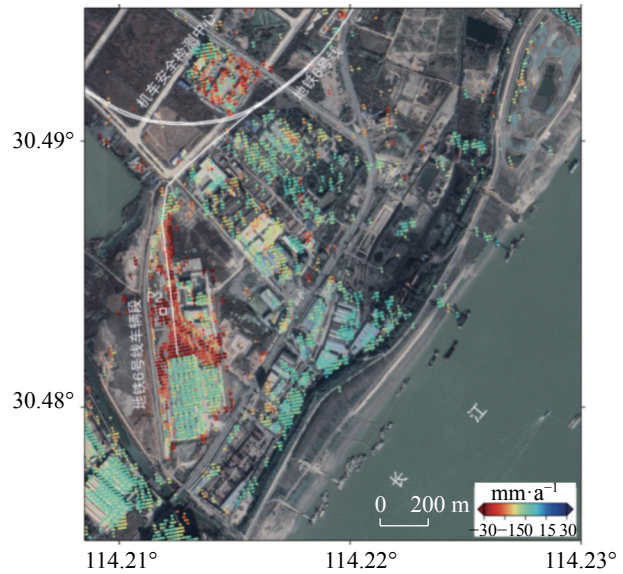


图 6 地铁 6 号线地面沉降速率图

Fig. 6 Ground subsidence rate of Metro Line 6

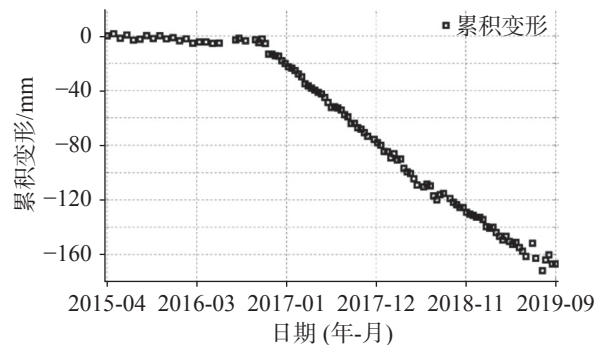


图 7 P2 点累积沉降与降雨

Fig. 7 Cumulative settlement and rainfall at P2

年 9 月间的累积地面沉降,累积沉降接近 170 mm。工程建设过程中,地基工程排水会造成工程周围区域地下水位下降,从而造成持续的地面沉降^[26]。因此,需要对工程建设期间周围设施与建筑进行密切监测。

4 结论与展望

(1)主要利用时间序列 InSAR 方法对覆盖武汉白沙洲岩溶塌陷高发区的升轨 Sentinel-1 SAR 数据集进行分析,识别分析了 2015 年 4 月至 2019 年 9 月时间段内实验区的地面沉降。夏季的集中降雨会大大增加覆盖着岩溶区上方的第四系土体重量,从而引起地面沉降;

(2)通过时序分析,在白沙洲和张家湾街道岩溶塌陷高发区发现了与降雨相关的季节性变形信号,

变形速率约为 $15 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$;

(3)在地铁6号线车辆段和青菱街道地区发现了与人类建设活动相关的地面沉降,最大变形速率达 $30 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$;

(4)研究证明 InSAR 技术可以在岩溶区地质灾害识别中发挥重要作用;

(5)随着 Sentinel-1 和未来美国 NISAR 任务的进行,可为岩溶区地质灾害提供大量的 SAR 数据,相信在未来可以提供大范围,高精度与高时间分辨率的地面沉降监测产品,为地灾的防治提供重要支撑。

致谢: 本文所利用的 Sentinel-1 数据由欧洲空间局免费提供。30 m 分辨率 AW3D 数据由日本宇宙航空研究开发机构提供。本文的降雨数据由中国气象网提供。

参考文献

- [1] 夏日元, 蒋忠诚, 邹胜章, 曹建华, 覃小群, 苏春田, 罗为群, 周立新. 岩溶地区水文地质环境地质综合调查工程进展[J]. 中国地质调查, 2017, 4(1): 1-10.
XIA Riyuan, JIANG Zhongcheng, ZOU Shengzhang, CAO Jianhua, QIN Xiaoqun, SU Chuntian, LUO Weiqun, ZHOU Lixin. Progress of hydrogeology and environmental geology comprehensive survey in karst area[J]. Geological Survey of China, 2017, 4(1): 1-10.
- [2] 吴应科, 毕于远, 郭纯青. 西南岩溶区岩溶基本特征与资源、环境、社会、经济综述[J]. 中国岩溶, 1998, 17(2): 141-150.
WU Yingke, BI Yuyuan, GUO Chunqing. A summary of basic features, resources, environment, sociality and economy in the karst areas of South-West China[J]. Carsologica Sinica, 1998, 17(2): 141-150.
- [3] 自然资源部地质灾害技术指导中心. 全国地质灾害通报(2019年)[Z]. 北京, 2019.
Geological Disaster Technical Guidance Center of the Ministry of Natural Resources. National Geological Hazard Bulletin (2019)[Z]. Beijing, 2019.
- [4] 贺凯, 李滨, 赵超英, 高杨, 陈立权, 刘朋飞. 基于易滑地质结构与多源数据差异的岩溶山区大型崩滑灾害识别研究[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 467-477.
HE Kai, LI Bin, ZHAO Chaoying, GAO Yang, CHEN Liqian, LIU Pengfei. Identification of large-scale landslides in karst mountainous areas based on the difference between the slippery geological structure and multi-source data[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 467-477.
- [5] 罗小杰, 沈建. 我国岩溶地面塌陷研究进展与展望[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 101-111.
LUO Xiaojie, SHEN Jian. Research progress and prospect of karst ground collapse in China[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 101-111.
- [6] 邓忠, 李珊, 高武振, 康志强. 覆盖型岩溶区城市地下轨道交通建设引发地质灾害风险与对策[J]. 城市地质, 2020, 15(3): 261-266.
DENG Zhong, LI Shan, GAO Wuzhen, KANG Zhiqiang. Geological disaster risk caused by construction of urban underground rail transit in covered karst area and its preventive measures[J]. Urban Geology, 2020, 15(3): 261-266.
- [7] 沈铭, 杨涛, 赵新建. 武汉市岩溶地面塌陷监测技术探讨[J]. 资源环境与工程, 2014(2): 177-180.
SHEN Ming, YANG Tao, ZHAO Xinjian. Discussion on monitoring technology of karst surface collapse[J]. Resources Environment & Engineering, 2014(2): 177-180.
- [8] 涂婧, 杨涛, 刘长宪, 吕玲, 彭惠. 基于GIS武汉岩溶塌陷区岩溶发育规律研究[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(1): 49-52, 73.
TU Jing, YANG Tao, LIU Changxian, LYU Ling, PENG Hui. Study on karst development law in Wuhan karst collapse area based on GIS[J]. Resource Environment and Engineering, 2014, 28(1): 49-52, 73.
- [9] 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(2): 171-179.
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(2): 171-179.
- [10] 廖明生, 张路, 史绪国, 蒋亚楠, 董杰, 刘宇舟. 滑坡变形雷达遥感监测方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
LIAO Mingsheng, ZHANG Lu, SHI Xuguo, JIANG Yanan, DONG Jie, LIU Yuzhou. Methods and practice of landslide deformation radar remote sensing monitoring[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [11] 白林, 江利明, 汪汉胜. 利用高分辨率 TerraSAR-X 数据监测武汉地区 2013~2015 年地面沉降[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(8): 832-836.
BAI Lin, JIANG Liming, WANG Hansheng. Monitoring ground subsidence in Wuhan City with high-resolution TerraSAR-X images from 2013 to 2015[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(8): 832-836.
- [12] Bai L, Jiang L M, Wang H S, Sun Q S. 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(4): 350.
- [13] Jiang Haonan. Land subsidence in Wuhan revealed using a nonlinear PSInSAR approach with long time series of COSMO-SkyMed SAR data[J]. Remote Sensing, 2021, 13(7): 1256.
- [14] 孙伟, 李江卫, 白洁, 童欣. 利用 PS-InSAR 技术监测武汉市主城区地面沉降[J]. 城市勘测, 2019(5): 120-125.
SUN Wei, LI Jiangwei, BAI Jie, TONG Xin. Using the PS-InSAR technique to monitor Wuhan urban district land subsidence[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2019(5): 120-125.

- [15] Zhou L, Guo J M, Hu J Y, Li J W, Xu Y F, Pan Y J, Shi M. Wuhan surface subsidence analysis in 2015–2016 based on Sentinel-1A data by SBAS-InSAR[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(10): 982.
- [16] Zhang Y, Liu Y, Jin M, Jing Y, Liu Y, Liu Y, Sun W, Wei J, Chen Y. Monitoring land subsidence in Wuhan City (China) using the SBAS-InSAR method with radarsat-2 imagery data[J]. *Sensors*, 2019, 19 (3): 743.
- [17] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8-20.
- [18] Shi X G, Yang C, Zhang L, Jiang H J, Liao M S, Zhang L, Liu XG. Mapping and characterizing displacements of active loess slopes along the upstream Yellow River with multi-temporal InSAR datasets[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 674: 200-210.
- [19] Berardino P, Fornaro G, Lanari R. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40 (11): 2375-2383.
- [20] 李长安, 张玉芬, 庞设典, 官善友. 以地貌单元为依据的工程地质分区研究: 以武汉市都市发展区城市地质研究为例[J]. *地质论评*, 2019, 65(3): 645-652.
LI Chang'an, ZHANG Yufen, PANG Shedian, GUAN Shanyou. Study on engineering geological zoning based on geomorphologic units: A case study of the Wuhan metropolitan development area[J]. *Geological Review*, 2019, 65(3): 645-652.
- [21] 官善友, 朱锐, 庞设典, 江丹. 武汉都市发展区工程地质分区研究[J]. *城市勘测*, 2016(6): 172-176.
GUAN Shanyou, ZHU Rui, PANG Shedian, JIANG Dan. The study for engineering geological zonation of metropolitan development area in Wuhan[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2016(6): 172-176.
- [22] 徐贵来. 武汉市覆盖层-岩溶地面塌陷形成机理与危险性评价[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.
XU Guilai. Formation mechanism and risk assessment of overburden-karst ground collapse in Wuhan[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016.
- [23] 涂婧, 魏瑞均, 杨戈欣, 刘长宪, 金小刚, 李海涛. 湖北武汉岩溶塌陷时空分布规律及其影响因素分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(6): 68-73, 93.
TU Jing, WEI Ruijun, YANG Gexin, LIU Changxian, JIN Xiaogang, LI Haitao. Analysis on spatial and temporal distribution characteristics of karst collapse and its influence factors in Wuhan City of Hubei Province[J]. *Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention*, 2019, 30(6): 68-73, 93.
- [24] 郑晓明, 金小刚, 陈标典, 刘鹏瑞, 杨戈欣, 李海涛, 杨涛. 湖北武汉岩溶塌陷成因机理与致塌模式[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(5): 75-82.
ZHENG Xiaoming, JIN Xiaogang, CHEN Biaodian, LIU Pengrui, YANG Gexin, LI Haitao, YANG Tao. Mechanism and modes of karst collapse in Wuhan City, Hubei Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(5): 75-82.
- [25] 陈冬琴. 武汉市青菱乡岩溶塌陷机理及数值模拟研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.
CHEN Dongqin. Research on karst collapse mechanism and numerical simulation in Qingling township, Wuhan City[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016.
- [26] Li Ying, He Zhongze, Yan Guihua, Han Fengyou. Foundation pit dewatering and ground subsidence in binary structural stratum of Wuhan[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 639-640: 694-699.

Monitoring subsidence characteristics of Baishazhou karst area in Wuhan with Sentinel-1 images from 2015 to 2019

YANG Chen¹, DENG Fei², SHI Xuguo³

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/ Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Bureau of Foshan Geological Survey, Guangdong Province, Foshan, Guangdong 528000, China; 3. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The karst region of southwest China includes , Guizhou, Yunnan, Guangxi, Sichuan, Hunan, Hubei, Guangdong and Chongqing. The region has a warm and humid climate with heavy rain, making it a zone of high incidence of geological disasters. China experienced 6,181 geological disasters in 2019, up 108.4% from 2,966 in 2018. These disasters caused the direct economic loss of 1.7 billion yuan, accounting for 61.4% of the total in China. Two hundred and twenty-four people are dead and missing, with 98 people in the karst mountainous areas of Chongqing, Sichuan, Guizhou, and Yunnan.

Numerous Chinese cities, including Guiyang, Guilin, Wuhan, Shenzhen, Guangzhou, etc., are situated in karst regions. According to statistics, more than 30 large and medium-sized cities and 420 counties and cities in China are

located in high-risk locations for ground collapse. One of the primary causes of geological disasters like ground collapse and ground deformation in cities is the development of subsurface karst, abundant karst groundwater, and a specific thickness of soil layer. In Wuhan, there is a sizable region of covered karst with extremely complicated geological conditions that are primarily distributed in an NWW-SEE direction. The Yangtze River is crossed by several karst belts. Consequently, karst environmental geological problems are widespread in this region, and karst geological disasters have resulted in considerable financial losses. The survey data shows that there have been more than 40 karst collapses since 1994. Human engineering activities have increased in intensity with the ongoing urbanization. Geological disasters have been happening more frequently year after year.

The technologies such geological radar detection, the automatic monitoring of sensor for water pressure dynamic change in karst pipeline system, the survey monitoring with the precise level, GPS monitoring, Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), etc. are used to monitor surface deformation in karst areas. Among them, InSAR has been widely used as a method to monitor wide-range deformation with high precision in recent years. InSAR shows its advantages of all-weather, all-time, extensive spatial coverage, weather durability, and high precision, compared to other conventional monitoring techniques. In this study, the researchers used InSAR technology to conduct time series analysis on the data of Synthetic Aperture Radar (SAR) such as TerraSAR-X, COSMOSkyMed, Sentinel-1, Radarsat-2, etc. This data was obtained in Wuhan at different time periods, which can indicate that the subsidence mainly occurred in soft soil areas and karst areas with intensified human activities.

Situated in Wuhan at $30^{\circ} 28' 0''$ – $30^{\circ} 32' 24''$ north latitude and $114^{\circ} 12' 30''$ – $114^{\circ} 18' 45''$ east longitude, the study area covers the embankment of the Yangtze River and the Zhoutou sub-district in Hanyang district, Baishazhou sub-district in Wuchang district, and Zhangjiawan sub-district and Qingling sub-district in Hongshan district, in which the alluvial lacustrine plain and the denudation accumulation hillock are dominant landforms and the terrace is developed in the river valley. Holocene loose sediments from the Quaternary primarily cover the surface. Clayey soil makes up the higher portion of the lithology, and silty fine sand makes up the lower portion. The risk of a karst collapse is high because the loose deposits are buried beneath soluble carbonate rocks. The historical karst collapse spots in the study area, mainly situated in the alluvial lacustrine plain. Due to intensified human activities, the incidence of karst collapse has also been increasing year by year, which can be indicated by 23 karst collapses between 1931 and 2019.

In this study, the elevated orbit Sentinel-1 SAR data set covering the high incidence area of karst collapse in Baishazhou, Wuhan, was analyzed with the time series of InSAR. Additionally, the land subsidence in the study area was identified and analyzed from April 2015 to September 2019. In the study area, the surface is mainly covered by loose deposits of the Quaternary Holocene, with cohesive soil in the upper part and fine sand in the lower part. The underlying soluble carbonate rocks under loose deposits may pose a high risk of karst collapse. Land subsidence resulted from the weight of the Quaternary soil covering the karst area has significantly increased by the concentrated summer rain. At high incidence zones of karst collapse in Baishazhou sub-district and Zhangjiawan sub-district, seasonal deformation signals connected to rainfall are discovered based on time series analysis, and the deformation rate is roughly $15 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$. Attributed to human construction activities, ground subsidence with a maximum deformation rate of $30 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ was also discovered in the depot of Metro Line 6 and Qingling sub-district. This study establishes the value of InSAR technology in identifying geological risks in karst regions. A significant amount of SAR data can be offered for geological disasters in karst areas thanks to the development of Sentinel-1 and the upcoming NISAR mission of the United States. It is anticipated that, in the future, land subsidence monitoring products with large range, high precision and hightime-resolution will be available for the prevention and control of geological disasters.

Key words karst area, surface subsidence, time series InSAR, rainfall

(编辑 张玲)