

杨辰, 金源, 邓飞, 等. 基于 Sentinel-1 时序 InSAR 分析的安徽铜陵地表形变监测及时空特征解译[J]. 中国岩溶, 2025, 44(3): 621-631, 644.

DOI: 10.11932/karst20250310

基于 Sentinel-1 时序 InSAR 分析的安徽铜陵地表形变监测及时空特征解译

杨辰^{1,2}, 金源³, 邓飞⁴, 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. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西 平果 531406; 3. 中国地质大学地理与
信息工程学院, 湖北 武汉 430078; 4. 广东省佛山地质局, 广东 佛山 528000)

摘要: 安徽省铜陵市与岩溶和采矿等相关的塌陷等地质灾害广泛发育, 监测岩溶区的时空形变特征对灾害防治具有重要意义。合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 具有广覆盖、穿透云雾与高精度形变监测等优点, 在地质灾害监测中取得广泛应用。文章利用小基线数据集 (small baseline subset, SBAS) InSAR 技术对覆盖铜陵市铜官区和义安区 2015—2021 年的 Sentinel-1 数据进行分析, 探测到新桥矿区、老鸦岭、笔架山六国化工厂等局部形变区。老鸦岭和新桥矿区形变区主要集中在矿业开采形成的尾矿坝, 视线向最大形变速率分别为 $68 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $118 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中老鸦岭的形变区受到强降雨影响。笔架山最大视线向形变速率约为 $48 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 主要与周边施工活动有关。研究证明 InSAR 技术可为岩溶区大范围地质灾害识别提供重要支持。

关键词: 岩溶区; 形变监测; 时序 InSAR; 降雨; 采矿

创新点: 利用 SBAS-InSAR 技术处理铜陵地区 Sentinel-1 数据, 识别出多处局部形变区, 结合降雨等数据揭示了岩溶地质条件和矿业开采等人类活动共同作用造成了本区域的形变特征。

中图分类号: P237; P642.26 **文献标识码:** A

文章编号: 1001—4810 (2025) 03—0621—11

开放科学(资源服务)标识码 (OSID):



0 引言

安徽省沿江地区是国内岩溶塌陷地质灾害相对发育的地区, 其中铜陵市最为发育^[1]。近年来铜陵市经济快速发展, 随着矿产资源及岩溶水资源被大量开采, 岩溶塌陷日益增多, 尤其是矿山开采过程中对采矿区排水疏干, 造成了矿山周边大规模的岩溶塌陷, 据统计, 区内累计形成塌陷坑约 500 个, 影响面积达 $410 \times 10^4 \text{ m}^2$ ^[2], 岩溶塌陷灾害分布面积广, 破坏城

市建筑、造成地面不均匀沉降, 危害极大。

据不完全统计, 自 20 世纪 50 年代至 2001 年矿山累计发生 18 处因采疏地下水导致的岩溶塌陷, 其中 14 处集中分布在铜陵市周边, 共产生塌陷坑 331 个, 影响面积达 $371.9 \times 10^4 \text{ m}^2$ ^[2]。2005 年 1 月—2015 年 9 月, 区内 10 处岩溶地面塌陷共产生塌陷坑 142 个, 影响面积达 $33 \times 10^4 \text{ m}^2$ ^[3]。位于天马山硫金矿床西北的小街地区, 从 1955 年开始有岩溶塌陷发生, 至 2017 年先后有 31 处被列为岩溶地质塌陷灾害点,

资助项目: 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费重大项目(2021004); 中国地质调查项目(DD20230720)

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

通信作者: 金源(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 星载雷达干涉测量方法与应用。E-mail: jyuan@cug.edu.cn。

收稿日期: 2023—04—27

造成经济损失 1.6 亿元, 塌陷伴生大量地裂缝和地面不均匀沉降, 随着矿产资源的持续开发, 后续仍可能发生岩溶塌陷^[4-5]。位于朝山村的大型岩溶塌陷区, 从 2011 年 12 月 10 日到 2012 年 1 月 8 日累计产生塌陷坑 48 处, 塌陷坑密度每平方公里 200 个, 造成地面开裂、公路河道损坏, 给当地居民的生命财产安全留下了极大隐患^[6]。

地质灾害隐患点通常位于地表形变具有明显迹象的区域, 如果地对地表进行实时形变监测, 就能实现全面识别地质灾害隐患点并及时预警^[7]。铜陵市政府已采取埋桩法、上漆法等简易监测手段对已知灾害隐患点进行了监测^[8], 但这种方法无法获得大区域的沉降信息, 难以排查监测未知的隐患灾害。近年来, 合成孔径雷达干涉测量(InSAR)作为一种大范围高精度的形变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^[9]。随着永久散射体干涉测量(Persistent Scatterers InSAR, PSI)与小基线干涉测量技术(Small baseline InSAR, SBAS-InSAR)等时序 InSAR 技术的陆续提出^[10], 通过利用 InSAR 数据中的相干像素进行高精度地表形变监测, 在地质灾害识别监测中发挥着越来越重要的作用^[9,11-12]。

本文采用 SBAS 技术对 2015-2021 年 Sentinel-1 数据集进行分析, 获取了安徽铜陵铜官区和义安区的地表形变时空特征。通过形变速率图, 识别出新桥矿区、老鸦岭、笔架山和六国化工厂四个局部形变区, 并对四个形变区的时序形变特点和影响因素进行分析。

1 实验区与数据简介

铜陵市位于安徽省中南部, 长江中下游南岸, 地处沿江平原丘陵区, 属于亚热带湿润季风气候, 总面积 2991.87 km², 是皖江经济带重要区域。铜陵自然资源丰富, 尤以矿产资源储量丰, 矿种全而闻名, 被誉为“中国古铜都”^[13], 已探明的矿种主要有铜、硫、铁、金、银、煤、石灰石等, 因此铜陵作为国家重要的矿产产区, 目前全市领证开采矿山 220 座, 年采掘矿石量 3000 m³, 采选矿业总产值 20 余亿元^[2]。铜陵市碳酸盐岩地层十分发育, 累计厚度达 1500 m 以上, 集中在中上石炭统至下二叠统和中下三叠统 2 个地质时期, 由于矿山开采疏干、抽水等因素, 导致铜陵饱受岩溶塌陷等地质灾害威胁。

本文以铜陵市铜官区和义安区为研究区, 位于安徽省中南部, 长江中下游南岸。区内的可溶岩分布广泛, 研究区内金银铜铁硫等矿产丰富, 具有 3500 余年的开采历史, 因此, 岩溶塌陷、采空塌陷等地质灾害广泛发育。图 1 中圆圈标记了历史岩溶塌陷位置 130 处, 主要集中于铜官区狮子山附近。图 1a 展示了研究区的地形及岩溶发育状况。研究区的地貌如图 1b, 区内地形南高北低, 以北为长江冲积平原区, 地形平坦低洼, 标高 6.5~20 m。以南为低山丘陵区, 地形起伏大, 标高一般 50~250 m, 最高为铜官山 493 m。

Sentinel-1 为欧洲空间局哥白尼计划重要组成部分, 由两颗极轨卫星组成。Sentinel-1A 与 Sentinel-1B 分别于 2014 年 4 月 3 日和 2016 年 4 月 25 日发

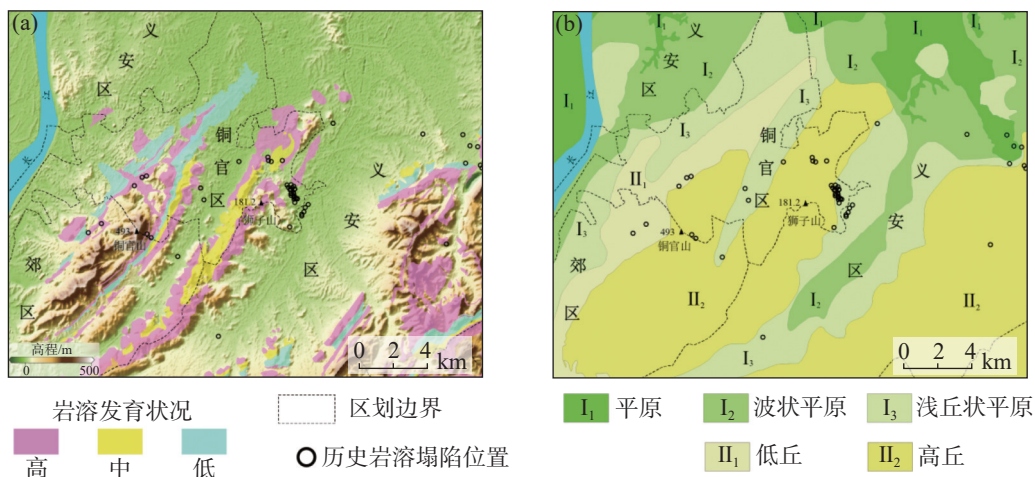


图 1 实验区地形和岩溶发育状况及地貌分区

Fig. 1 Topography, karst development characteristics, and geomorphic zoning of the experimental area

射升空,其中 Sentinel-B 于 2021 年 12 月 23 日出现电力故障,停止工作。Sentinel-1 卫星的主要工作模式为干涉宽幅(Interferometric Wide, IW)模式,使用 TOPS(Terrain Observation by Progressive Scan)成像,覆盖范围可达 250 km。本文获取了 2015 年 4 月至 2021 年 12 月的 184 景 Sentinel-1 升轨数据进行干涉处理,数据干涉组合如图 2。本文获取了日本宇宙航空研究开发机构 AW3D 30m 数字地表模型进行差分干涉图生成和地理编码。同时获取了铜陵气象站点日值降雨数据进行岩溶区形变影响因素分析。

2 时序 InSAR 分析方法

SBAS-InSAR 技术采用多主影像方式,通过组合短时间和空间基线的干涉对,可以提取在永久散射体和一定时间内保持稳定的分布式目标^[10]。因此,为了更好地利用场景中的分布式目标,本文采用此技术获取实验区的地表形变和时空特征。

假设获取到铜陵地区的 $N+1$ 幅 Sentinel-1 SAR 数据,其获取时间按顺序排列分别为 $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ 。论文首先选取 2019 年 04 月 16 日获取的数据为参考影像,采用几何配准与增强谱分集方法将剩余数据配准至参考数据空间,形成图 2 所示的 M 对干涉组合,并利用 AW3D DEM 移除地形相位。论文采用振幅离差与时间相干性的方式提取干涉图中相干点目

标^[14],对选中点目标进行离散相位解缠。其中第 j 幅干涉图为 t_a 和 t_b 两个时刻的 SAR 影像组合而成,其在某一地面目标点处的干涉相位 $\delta\varphi_{ab}$ 表示为:

$$\delta\varphi_{ab} = \varphi_b - \varphi_a \approx \frac{4\pi}{\lambda} [d_b - d_a] + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_n \quad (1)$$

式中: λ 为波长; d_a 和 d_b 为 t_a 和 t_b 两个时刻相对起始时刻 SAR 卫星视线方向的累积形变量; φ_{topo} 为地形残差相位; φ_{atm} 为大气延迟相位; φ_n 为噪声相位。

地形残差相位可以利用基线与地形之间的线性关系估计,通过最小二乘进行估计^[15]。大气相位通过相位堆叠方法求解,采用叠加求和的方式来估计共有日期的大气延迟相位^[16]。在估计并移除上述两个相位分量后,上式简化为:

$$\delta\varphi_{ab} = \varphi_b - \varphi_a \approx \frac{4\pi}{\lambda} [d_b - d_a] \quad (2)$$

为了获取时序形变信息,地表形变引起的相位变化与时间成线性关系:

$$v_j = \frac{\varphi_j - \varphi_{j-1}}{t_j - t_{j-1}} \quad (3)$$

相应的,第 j 幅干涉图的形变相关相位可以表示为:

$$\sum_{k=t_{a,j}+1}^{t_{b,j}} (t_k - t_{k-1}) v_k = \delta\varphi_j \quad (4)$$

式(4)可以简化为:

$$BV = \delta\varphi \quad (5)$$

式中: B 为式(6)所示系数矩阵,其中+1 表示主影像,-1

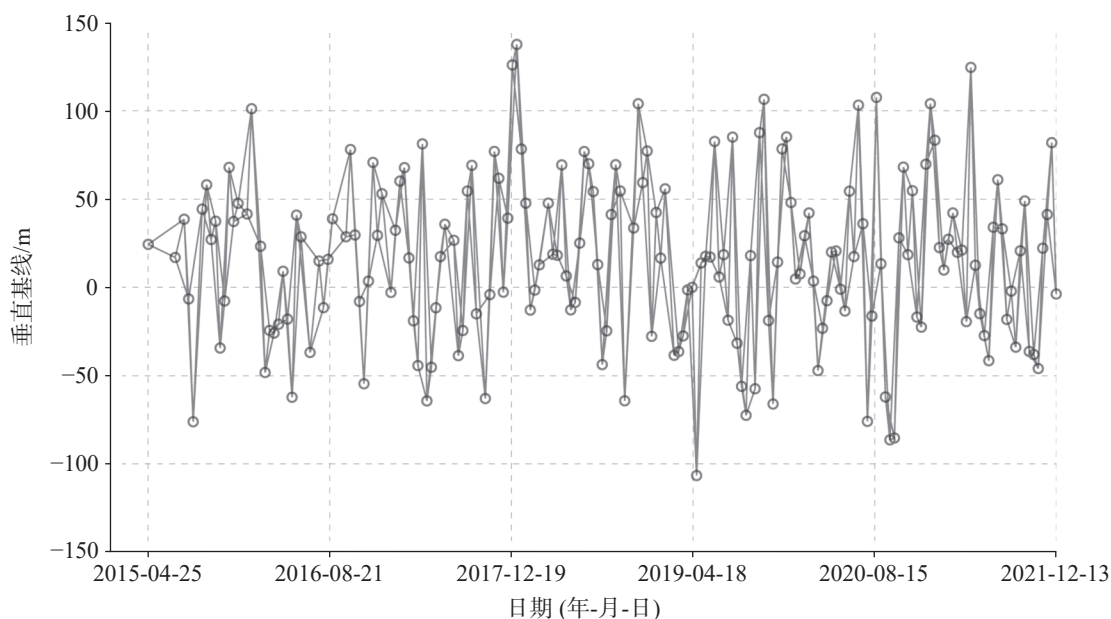


图2 Sentinel-1 干涉对组合

Fig. 2 Interferometric combinations of Sentinel-1 data

表示从影像; V 为速度向量; $\delta\varphi$ 为形变相位向量。最终的时间序列形变和形变速率可以通过最小二乘求解。

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & +1 & \cdots \\ 0 & 0 & +1 & 0 & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix} \quad (6)$$

3 实验结果分析

3.1 实验区平均形变速率

图 3 给出了利用 Sentinel-1 数据获取铜陵的视线向平均形变速率, 本文共提取到 887481 个相干目标, 平均观测密度为 $2010 \text{ 个} \cdot \text{km}^{-2}$ 。相干目标主要分布于地形较为平缓的区域, 地势高的区域植被较多, 时间去相干影响较大。实验区整体稳定, 其中, 以新桥矿区形变最为明显, 最大形变速率达到 $118 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 在老鸦岭水库和笔架山岩溶区均探测到形变。主要形变区与历史岩溶塌陷及岩溶分布区距离较近, 存在一定的相关性。

3.2 新桥矿区形变特征

新桥矿区岩溶地质发育强烈, 水文地质条件复杂, 地形低洼汇水, 下伏碳酸岩盐发育, 上覆第四系砂砾层亚黏土, 土层厚度 $10 \sim 30 \text{ m}$, 属于岩溶充水矿床^[17]。矿区自 1973 年勘探开始, 随着矿山逐步开采,

累计塌陷 150 余处, 总影响面积约 $110 \times 10^4 \text{ m}^{2[2]}$, 铜陵市将新桥矿区列入岩溶地面塌陷预防监测重点地段。

图 4 中的 InSAR 观测结果显示新桥矿区周边存在最大约 $118 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的形变, 位于 P1 处新桥矿区南部的新四房排土场^[18], 受工程建设影响, 此处在观测期间发生了非常明显的形变, 平均形变速率为 $85 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 图 5a 显示视线向累积形变量达到了 572 mm , 形变整体呈现线性。P2 处位于新桥矿区北部的露天矿场, 受矿区开采工作的影响, 形变速率达到了 $34 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 图 5b 显示视线向累积形变达到了 281 mm 。其中, P2 处形变在 2020 年开始出现显著加速趋势, 根据铜陵化工集团新桥矿业有限公司已公布年度环境报告书^[19], 获取了 2017 年至 2020 年新桥矿区的矿石年开采量如图 6, 其中开采量最大的铜料在 2020 年开采量达到 6 380 万 t, 较往年开采量提升了近 50%, 推测可能是由于矿场开采活动加剧造成了形变加速现象。

3.3 老鸦岭水库形变特征

老鸦岭水库是冬瓜山铜矿尾矿库, 图 7 给出的形变速率图显示形变集中在尾矿库矿渣堆积体上^[20], 最大形变速率约 $68 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

图 8 给出了位于矿渣堆积体上 P3 的时序累积形变结果, 累积形变达到了 272 mm , 受矿区矿渣堆

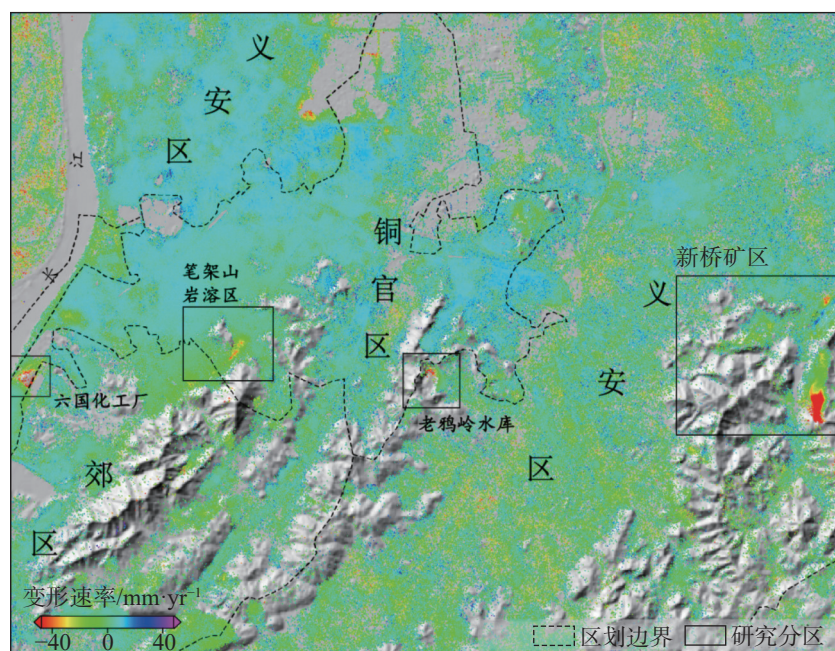


图 3 利用 Sentinel-1 数据提取的实验区平均形变速率图

Fig. 3 Mean displacement rate map of the study area derived from Sentinel-1 InSAR data

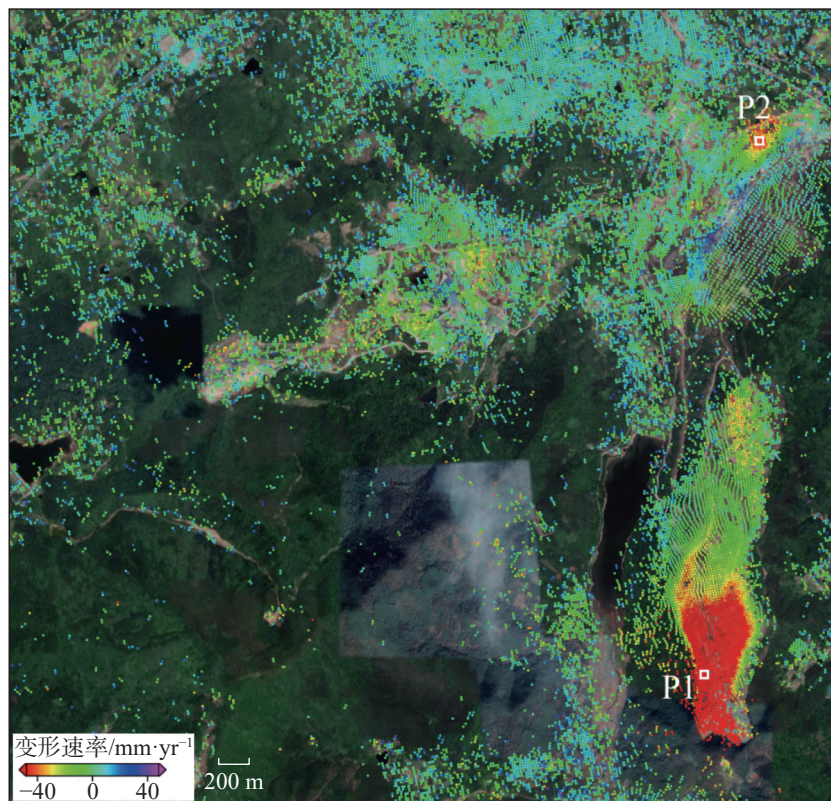


图 4 新桥矿区平均形变速率图

Fig. 4 Mean displacement rate map of the Xinqiao Mining Area

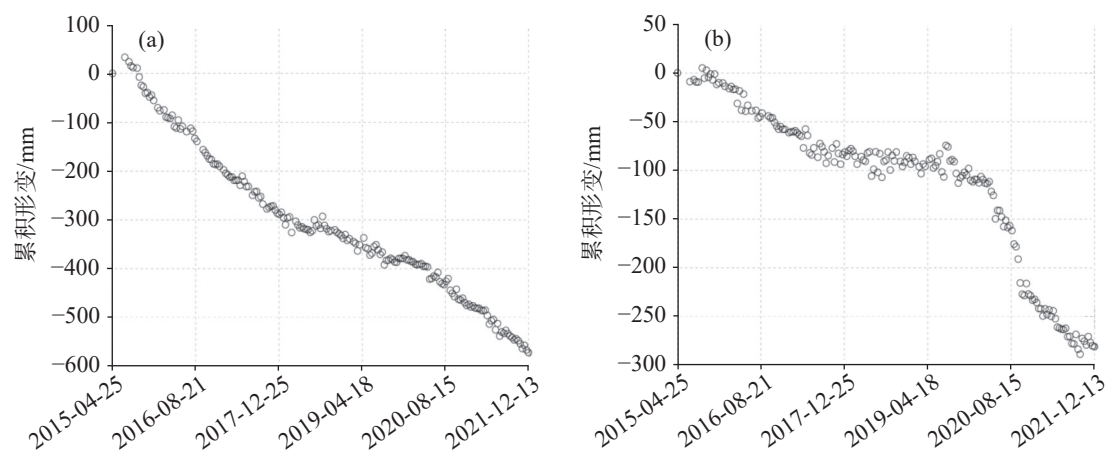


图 5 (a) P1 点和 (b) P2 点累积沉降

Fig. 5 (a) Cumulative settlement at point P1 and (b) point P2

积等人为生产活动影响,堆积体表面在不同时期出现一定的抬升趋势。结合最近的铜陵气象站日值降雨数据对时序形变进行分析,可发现降雨一定程度上会加剧形变,例如,2016年、2020年和2021年大幅度降雨,堆积体表面呈现加速形变特征,表明剧烈降雨会加剧堆积体的形变。

3.4 笔架山岩溶区形变特征

笔架山区域位于铜官山背斜西北翼,主要地层为二叠系栖霞组,岩溶发育强烈,含水丰富,是铜陵市岩溶塌陷发生的主要地层^[2]。图 9 给出了笔架山区域的形变速率,形变区速率为 $10\sim 48\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。形变区域位于笔架山和大铜官山之间的山谷中,呈现长

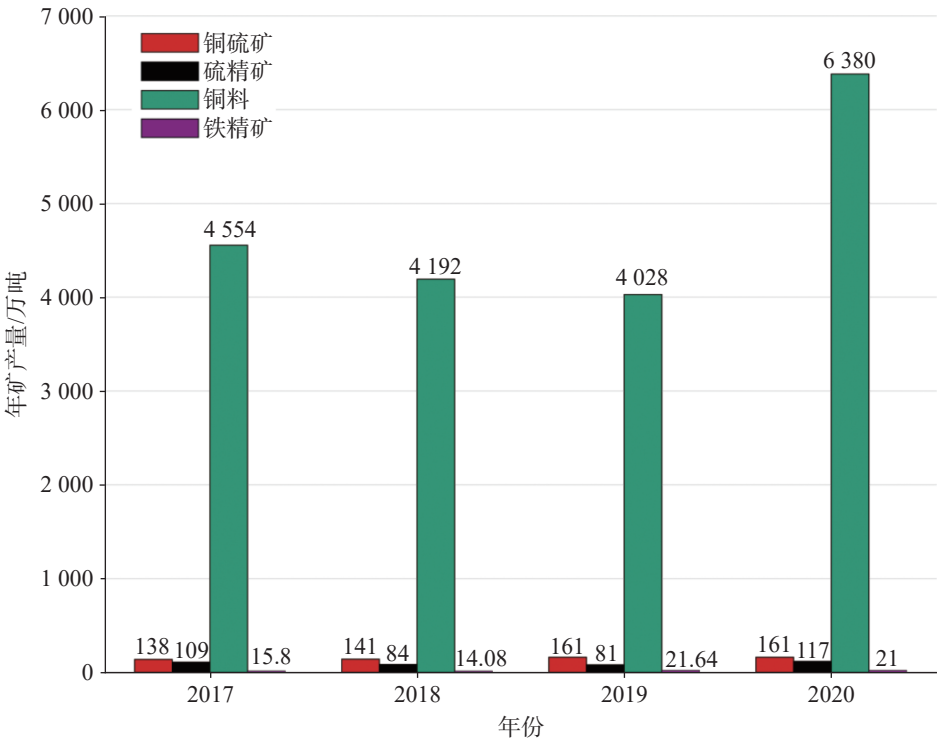


图 6 新桥矿区历年矿产量

Fig. 6 Annual mineral production of the Xinqiao Mining Area over the years

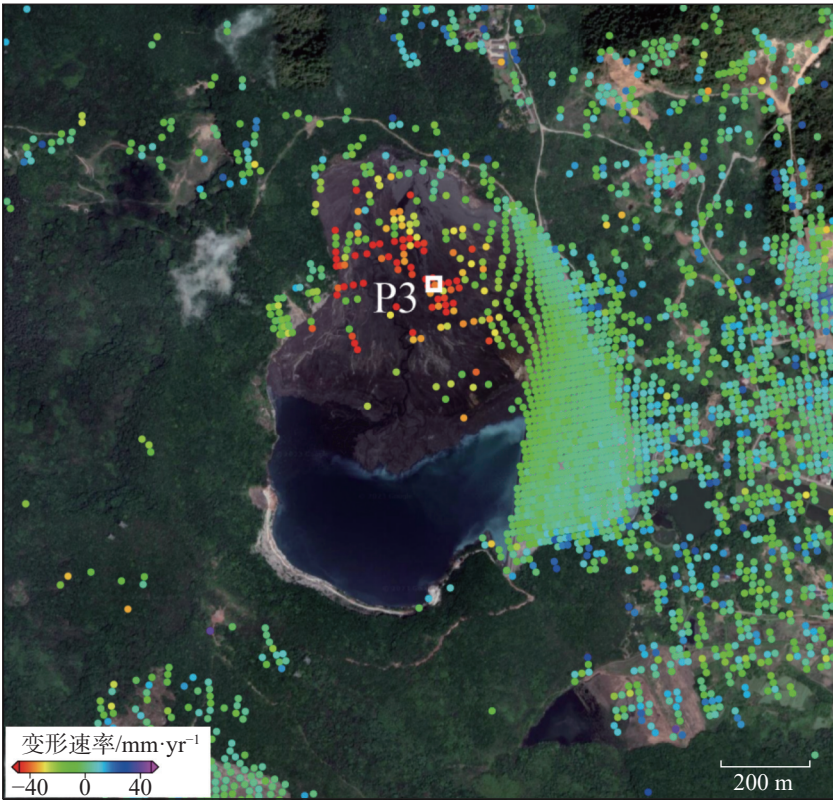


图 7 老鸦岭水库平均形变速率图

Fig. 7 Mean displacement rate map of the Laoyaling reservoir

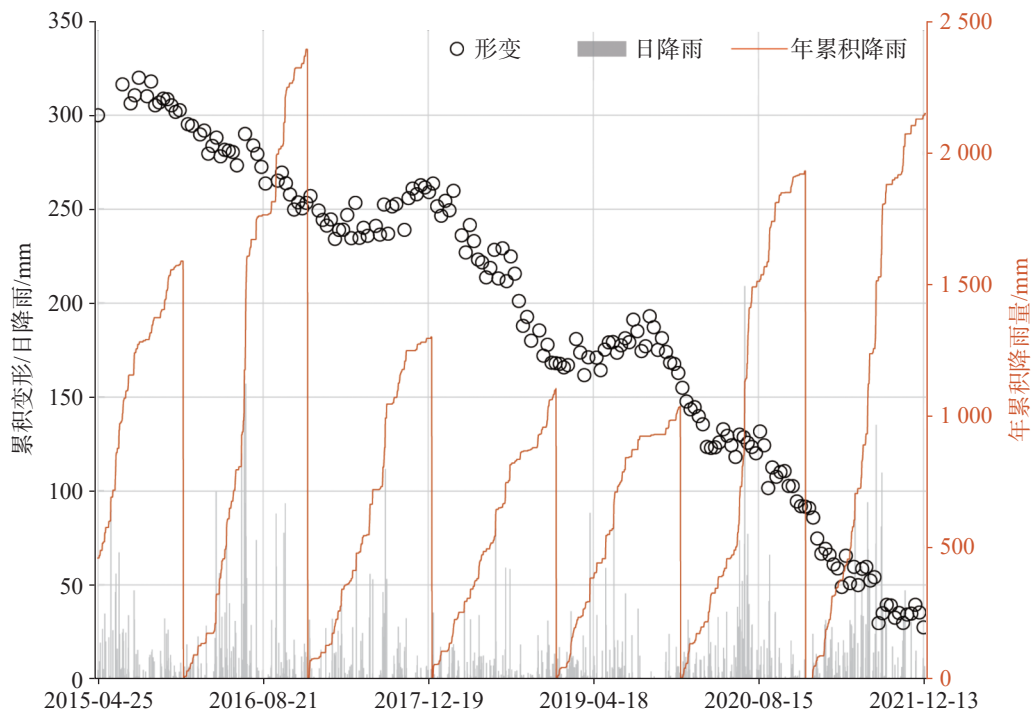


图 8 P3 点累积沉降

Fig. 8 Cumulative settlement at point P3

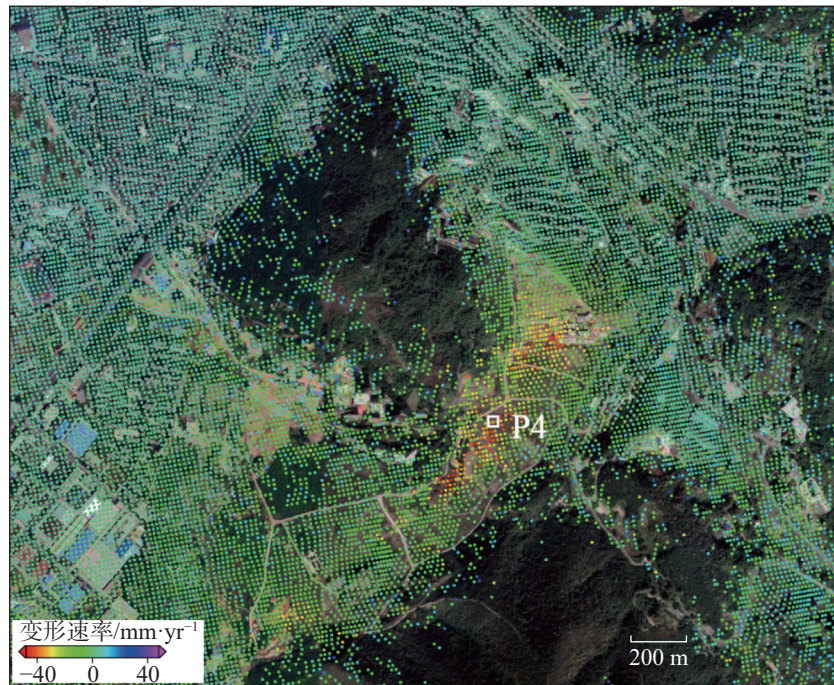


图 9 笔架山平均形变速率图

Fig. 9 Mean displacement rate map of the Bijiashan Mountain

条形,该处形变区域并未出现在以往的地质灾害调查结果中,可能是新的灾害隐患点。在形变最为明显区域选择 P4 点进行分析,图 10 给出了 P4 点的时间序列形变,该点视线向最大累积形变达到了 120 mm,同时发现 P4 处形变逐渐减缓。获取该区域

谷歌地球历史光学影像(如图 11),发现 P4 点东北侧形变可能与新楼盘建设有关,同时 P4 点所处区域可能是施工建设的堆填区,随着时间推进 P4 点的固结沉降逐渐趋于稳定。

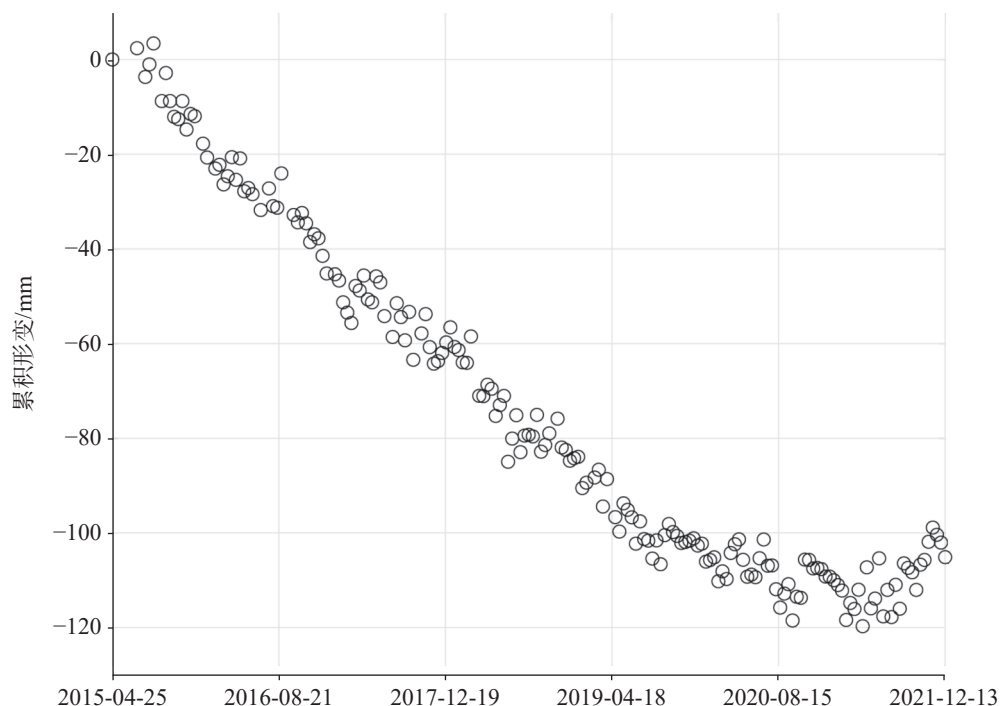


图 10 P4 点累积沉降

Fig. 10 Cumulative settlement at point P4



图 11 P4 点所在区域历史光学影像

Fig. 11 Historical optical imagery of the area surrounding control point P4

3.5 六国化工厂形变特征

六国化工厂形变区位于铜官区西侧,位于长江东岸的六国化工厂内,由于工厂建设导致大量的堆积体,图 12 给出的形变速率图显示形变集中在堆积体四周,堆积体最大形变速率约 $65 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,图 13 给出了 P5 点的时间序列形变,该点累积形变达到了 353 mm。通过图 14 谷歌地球历史光学影像可以发现,该处区域在 2017 年前主要为化工厂生产堆积区域,之后开始修建厂房,期间该区域形变开始加速,至 2021 年初,厂房基本建设完成,后续堆积物逐步

清理,形变开始减缓,该处区域形变主要与工厂的生产建设活动有关。

4 结论与展望

本文利用 SBAS-InSAR 技术对覆盖铜陵地区的 Sentinel-1 数据进行处理,获取了 2015-2021 年间的资料,发现新桥矿区、老鸦岭、笔架山和六国化工厂等局部形变区。最大形变位于新桥矿区,速率约为 $118 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。通过对上述局部形变区的分析发现,岩溶地质条件和矿业开采等人类活动共同作用造成了

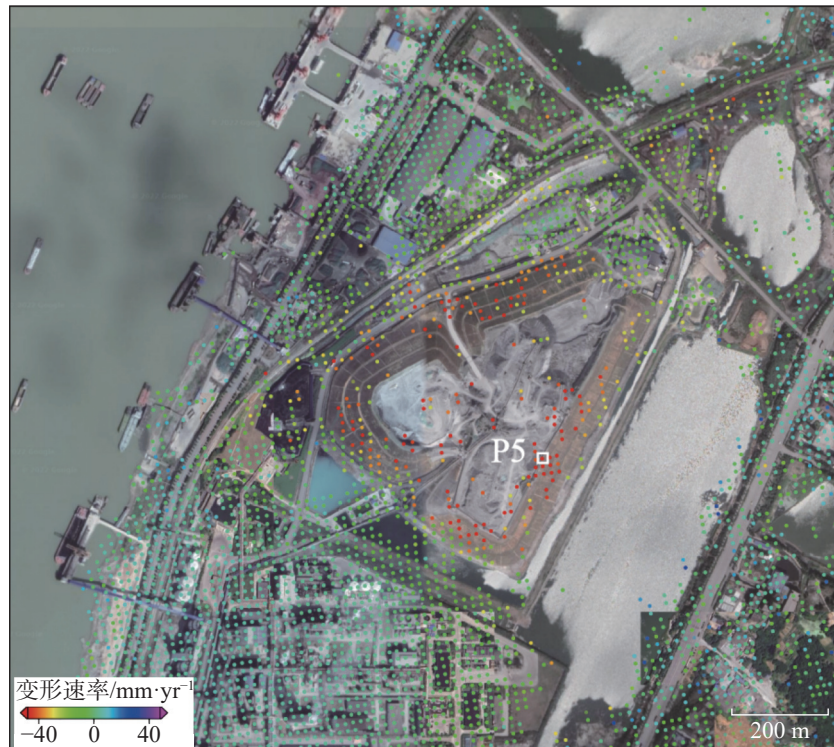


图 12 六国化工厂平均形变速率图

Fig. 12 Mean displacement rate map of the Liuguo Chemical Plant

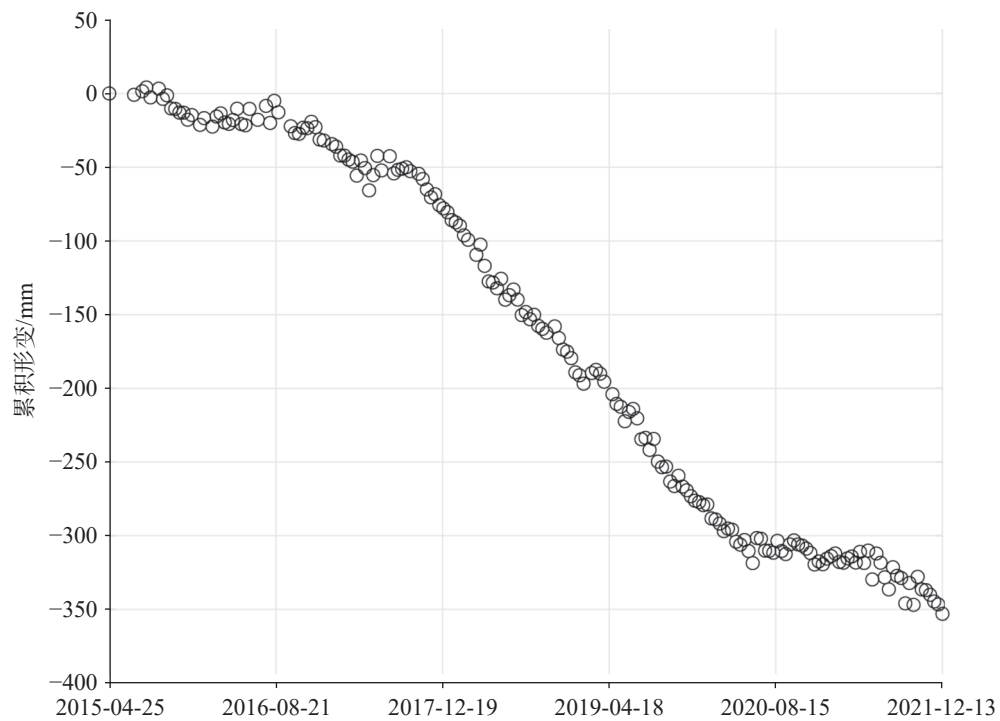


图 13 P5 点累积沉降

Fig. 13 Cumulative settlement at point P5

本区域的形变特征。特别是老鸦岭尾矿库形变还受到降雨影响。本文的研究表明, InSAR 技术可以用于大范围地质灾害识别监测, 为地质灾害的防治提

供重要的信息。对于形变较大的区域, 建议安装布设相应的地面监测手段, 详细评估险情。随着我国陆探卫星以及未来卫星任务的开展, 大量的 SAR 卫



图 14 P5 点所在区域历史光学影像

Fig. 14 Historical optical imagery of the area surrounding control point P5

星数据得以应用,可以进一步分析形变区域的特征,对灾害点进行更为精细的监测和评估,InSAR 技术将在此区域灾害监测中发挥更加重要的作用。

致谢: 本文所采用的 Sentinel-1 数据由欧洲空间局免费提供。30 m 分辨率的 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] 汪庆玖,叶小华,孟滕,罗娇,吕传忠. 安徽省沿江地区典型岩溶塌陷区盖层-岩溶组合特征[J]. 中国岩溶, 2017, 36(6): 859-866.
WANG Qingjiu, YE Xiaohua, MENG Meng, LUO Jiao, LYU Chuanzhong. Characteristics of caprock-karst combination in typical karst collapse area along the Yangtze River in Anhui Province[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(6): 859-866.
- [2] 雷柱平,许丹,蒋艳娇,等. 铜陵市幅 H50E007016 岩溶地面塌陷调查说明书[DS]. 全国地质资料馆, 2016. DOI: 10.35080/n01.c.148733.
- [3] 雷柱平. 安徽省铜陵地区岩溶地面塌陷发育现状[J]. 安徽地质, 2018, 28(2): 131-135.
LEI Zhuping. Current situation of the development of karst ground collapses in Tongling, Anhui province[J]. Geology of Anhui, 2018, 28(2): 131-135.
- [4] 武奕立. 铜陵地区矿山地质灾害调查技术与方法应用[J]. 化工矿产地质, 2018, 40(2): 114-119.
WU Yili. Technology and method application of mining geological disaster survey in Tongling area, Anhui[J]. Geology of Chemical Minerals, 2018, 40(2): 114-119.
- [5] 汪璐. 铜陵市地质灾害特征及发育规律[J]. 现代矿业, 2022, 38(11): 22-26.
WANG Lu. Characteristics and Development Regularity of Geological Disasters in Tongling City[J]. Modern Mining, 2022, 38(11): 22-26.
- [6] 查甫生,刘从民,苏晶文,吴长贵,崔可锐. 铜陵市朝山地区岩溶塌陷形成条件与地面稳定性评价分析[J]. 地质论评, 2020, 66(1): 246-254.
ZHA Pusheng, LIU Congmin, SU Jingwen, WU Changgui, CUI Kerui. Formation conditions of karst collapse and evaluation of ground stability in Chaoshan area of Tongling City[J]. Geological Review, 2020, 66(1): 246-254.
- [7] 代志宏,卢鹏,张志芳,汪晓龙,许国,董建明. 基于 PS-InSAR 技术的南宁地表沉降监测与分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(5): 491-496,519.
DAI Zhihong, LU Peng, ZHANG Zhifang, WANG Xiaolong, XUGuo, DONG Jianming. Surface Subsidence Monitoring and Analysis of Nanning Based on PS-InSAR Technology[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(5): 491-496,519.
- [8] 铜陵市人民政府办公室. 铜陵市人民政府办公室关于印发铜陵市 2021 年度地质灾害防治方案的通知[EB]. https://www.ah.tlyaq.gov.cn/zwgk/yaq_zczxdx/202112/t20211231_1740305.html.
- [9] 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.
YANG Chen, DENG Fei, SHI Xuguo. Monitoring subsidence characteristics of Baishazhou karst area in Wuhan with Sentinel-1 images from 2015 to 2019[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(3): 558-564.
- [10] 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.
- [11] 朱同同,史绪国,周超,蒋厚军,张路,廖明生. 利用 2016—2020 年 Sentinel-1 数据监测与分析三峡库区树坪滑坡稳定性[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1560-1568.
ZHU Tongtong, SHI Xuguo, ZHOU Chao, JIANG Houjun, ZHANG Lu, LIAO Mingsheng. Stability Monitoring and Analy-

- sis of the Shuping Landslide in the Three Gorges Area with Sentinel-1 Images from 2016 to 2020[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1560-1568.
- [12] 史绪国, 徐金虎, 蒋厚军, 张路, 廖明生. 时序 InSAR 技术三峡库区藕塘滑坡稳定性监测与状态更新[J]. *地球科学*, 2019, 44(12): 4284-4292.
- SHI Xuguo, XU Jinhu, JIANG Houjun, ZHANG Lu, LIAO Mingsheng. Slope Stability State Monitoring and Updating of the Outang Landslide, Three Gorges Area with Time Series InSAR Analysis[J]. *Earth Science*, 2019, 44(12): 4284-4292.
- [13] 李闽, 王联军, 罗小利. 铜陵矿区矿山地质环境问题及治理对策[J]. *中国矿业*, 2014, 23(5): 67-70.
- LI Min, WANG Lianjun, LUO Xiaoli. Mine geological environment problems and countermeasures in Tongling mining area[J]. *China Mining Magazine*, 2014, 23(5): 67-70.
- [14] Jiang Mi, Guarnieri Andrea Monti. Distributed Scatterer Interferometry With the Refinement of Spatiotemporal Coherence. [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2020, 58(6): 3977-3987.
- [15] 史绪国, 张路, 许强, 赵宽耀, 董杰, 蒋厚军, 廖明生. 黄土台塬滑坡变形的时序 InSAR 监测分析[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2019, 44(7): 1027-1034.
- SHI Xuguo, ZHANG Lu, XU Qiang, ZHAO Kuanyao, DONG Jie, JIANG Houjun, LIAO Mingsheng. Monitoring Slope Displacements of Loess Terrace Using Time Series InSAR Analysis Technique[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1027-1034.
- [16] Wang Kang, Yuri Fialko. Observations and Modeling of Coseismic and Postseismic Deformation Due To the 2015 Mw 7.8 Gorkha (Nepal) Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(1): 761-779
- [17] 汪庆玖. 安徽铜陵新桥矿区岩溶塌陷监测与预警研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- [18] 葛建. 铜陵化工集团新桥矿业有限公司新四房排土场优化改造研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2017.
- [19] 铜陵化工集团新桥矿业有限公司. 2020 年度环境报告书[EB]. <http://www.xqmc.com/huanbaozixun/2021091316558gs2yx.html>
- [20] 徐洁, 钱柏青, 孔祥龙. 老鸦岭水库型尾矿库后期干滩面扬尘分析及防治措施[J]. *有色金属工程*, 2013, 3(4): 45-48.

Monitoring of surface deformation and its spatiotemporal characterization in Tongling City of Anhui Province based on time-series InSAR of Sentinel-1 data

YANG Chen^{1,2}, JIN Yuan³, DENG Fei⁴, SHI Xuguo³

(1. Institute of karst geology, CAGS/ Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China; 3. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430078, China; 4. Bureau of Foshan Geological Survey, Guangdong Province, Foshan, Guangdong 528000, China)

Abstract Tongling City, located in the south-central part of Anhui Province on the southern bank of the middle and lower reaches of the Yangtze River, lies within the hilly region of the riverine plain and experiences a subtropical humid monsoon climate. With a total area of 2,991.87 square kilometers, it is a crucial region within the Wanjiang Economic Belt. Renowned as the "Ancient Copper Capital of China", Tongling is abundant in natural resources, particularly minerals, including copper, sulfur, iron, gold, silver, coal, and limestone. As a significant mining area in China, there are currently 220 licensed mines in Tongling, which are extracting 30 million cubic meters of ore annually, with a total mining and processing output exceeding two billion yuan. The carbonate rock strata in Tongling are highly developed, with a cumulative thickness of over 1,500 m. These strata are primarily concentrated in the Middle-Upper Carboniferous to Lower Permian and Middle-Lower Triassic geological periods. Due to factors such as mining dewatering and groundwater pumping, Tongling has been vulnerable to geological hazards such as karst collapses.

The sites with potential geological hazards are typically found in regions exhibiting clear signs of surface deformation. Real-time monitoring of surface deformation allows for comprehensive identification of the sites with potential geological hazards and timely early warnings. The simple monitoring methods, such as pile-embedding and painting to observe known hazard sites, have been employed; however, these techniques cannot capture large-scale subsidence data, making it difficult to detect and monitor unknown hazards. In recent years, Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) has been widely used as a large-scale, high-precision deformation monitoring tool. It offers

(下转第 644 页)

be categorized into two levels: high-risk and moderate-risk. The high-risk zone is mainly distributed around the sewage treatment plant and cement plant area, comprising 70.83 % of the total study area. Conversely, the moderate-risk zone is mainly located in the northwest corner of the study area, accounting for 29.17 % of the total.

In conclusion, it is recommended to strengthen the dynamic monitoring and management of groundwater, along with implementing measures to prevent and control surface sewage seepage. These actions are essential to protect the region from ground collapse hazards and to reduce the risk of disasters.

Key words karst ground collapse, formation mechanism, susceptibility, vulnerability, risk assessment

(编辑 张玲)

(上接第 631 页)

several advantages over traditional methods, including all-weather capability, continuous operation, extensive spatial coverage, and high accuracy. With the development of time-series InSAR techniques like Persistent Scatterers InSAR (PSI) and Small Baseline InSAR (SBAS-InSAR), high-precision surface deformation monitoring using coherent pixels within InSAR data has become increasingly important in identifying and monitoring geological hazards.

This study focuses on Tongguan District and Yi'an District in Tongling City, situated in the south-central part of Anhui Province, along the southern bank of the middle and lower reaches of the Yangtze River. The study area boasts extensive soluble rock distributions and rich mineral resources like gold, silver, copper, iron, and sulfur, with a mining history spanning over 3,500 years. Consequently, geological hazards like karst collapses and mining collapses are prevalent. Fig.1 marks 130 locations of historical karst collapse, primarily concentrated near Shizishan in Tongguan District. Fig.1a illustrates the terrain and karst development within the study area, while Fig.1b depicts the landform, characterized by higher terrain in the south and lower, flat terrain in the north (the Yangtze River alluvial plain, with elevations ranging from 6.5 to 20 m) and hilly terrain in the south (with significant topographic relief and elevations generally between 50 and 250 m, peaking at 493 meters at Tongguan Mountain).

This study utilizes SBAS-InSAR technology to process Sentinel-1 data covering Tongling City, identifying local deformation zones from 2015 to 2021, including the Xinqiao Mining Area, Laoyaling, Bijia Mountain, and Liuguo Chemical Plant. The maximum deformation rate, observed in the Xinqiao Mining Area, is approximately 118 mm/yr. Analysis of these deformation zones indicates that the combined effects of karst geological conditions and human activities like mining have contributed to the observed deformation characteristics. Notably, deformation in the Laoyaling tailings pond is also influenced by rainfall. Our findings demonstrate that InSAR technology can be effectively employed for large-scale geological hazard identification and monitoring, providing vital information for disaster prevention and control. For areas with significant deformation, it is recommended to install corresponding ground monitoring measures to assess risks in detail. With the launch of China's land exploration satellites and future satellite missions, abundant SAR satellite data will become available for more detailed analysis of deformation characteristics, enabling more precise monitoring and assessment of hazard sites. InSAR technology will play an increasingly critical role in disaster monitoring in this region.

Key words karst area, deformation monitoring, time-series InSAR, rainfall, mine

(编辑 张玲)