

# Research review of surface subsidence and deformation in goaf monitoring methods based on integration of space-air-ground

Qianqian Wu<sup>1</sup> Song Xu<sup>2\*</sup> Jian Zhang<sup>1</sup> Jian Jiang<sup>1</sup>

1. Anhui Tongguan (Lujiang) Mining Co., Ltd., Hefei, Anhui, 231563, China

2. School of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu, 211816, China

## Abstract

Mining can leave behind a large number of goaf areas, and surface subsidence and deformation in goaf areas can easily lead to collapse, often causing serious casualties. Therefore, the adoption of scientific monitoring technologies is of paramount significance for coordinating mining operations and advancing disaster prevention and mitigation efforts. In recent years, the application of “space-air-ground” integrated monitoring and its derivative monitoring technologies in areas such as goaf monitoring, slope and landslide monitoring has become increasingly mature, providing new directions and concepts for disaster prevention and reduction. This article summarizes and evaluates the current monitoring technology for surface subsidence and deformation in goaf from three aspects: space, air and ground. It is found that the measurement accuracy of InSAR technology and GNSS technology can reach millimeter level, but they have certain limitations, which lead to measurement errors. Although the measurement accuracy of UAV remote sensing technology is not enough, it has a strong ability to combine with other technologies. In the future, on the basis of the maturity of single technology, it should be the top priority to study the multi-technology fusion monitoring and form a disaster prevention system in the stages of monitoring, early warning, emergency response and disposal.

## Keywords

Goaf monitoring methods; Surface subsidence and deformation; Integration of space-air-ground

# 基于空天地一体化的采空区地表沉降变形监测技术研究

吴谦谦<sup>1</sup> 徐嵩<sup>2\*</sup> 张见<sup>1</sup> 江润<sup>1</sup>

1. 安徽铜冠(庐江)矿业有限公司, 中国·安徽合肥 231563

2. 南京工业大学交通运输工程学院, 中国·江苏南京 211816

## 摘要

矿山开采会遗留下大量采空区, 采空区地表发生沉降变形容易引发塌陷, 常造成严重的人员伤亡。因此, 采取科学的监测技术对矿区生产和防灾减灾意义重大。近年来, “空天地”一体化监测及其衍生监测技术在采空区监测及边坡、滑坡监测等领域的应用已经日趋成熟, 为防灾减灾提供了新的方向与理念。本文从“空天地”三个方面对当前采空区地表沉降变形监测技术进行总结与评价, 研究发现合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术与全球导航卫星系统(GNSS)技术测量精度能够达到毫米级, 但自身都存在一定局限性从而导致测量误差; 无人机遥感技术尽管测量精度不够, 但与其他技术结合的能力较强。未来在单项技术成熟的基础上, 研究多项技术融合监测并形成监测-预警-应急响应-处置等阶段的防灾体系应成为重中之重。

## 关键词

采空区监测技术; 地表沉降变形; 空天地一体化

## 1 引言

中国疆域辽阔, 煤炭、金属等矿产资源十分丰富, 但随着矿产资源的不断开采, 矿区原有的地质环境与地质结构发生了一定的改变, 容易诱发地质灾害<sup>[1]</sup>。《近十年非煤矿山典型事故特征及原因分析》<sup>[2]</sup>中共统计了191起矿山事

故, 共有14个类型, 死亡人数约为400人。而采空区地表沉降变形则是较为常见的一类灾害, 在开采过程中, 沉降较为迅速, 沉降量可达1~2 m/年; 而开采后的开始阶段与衰退阶段沉降速度变缓, 但在活跃阶段沉降量依旧较大, 当沉降量达到一定程度时会引起地面塌陷<sup>[3]</sup>。近年来, 随着矿产资源开发规模与强度的持续扩大, 矿区地表沉陷不仅严重破坏了矿区地表原始地貌形态和植被生态系统, 更诱发沉陷区域内工业建筑、民用住宅及交通基础设施出现结构性损毁与变形。这种复合型地质环境灾害已对区域生态安全构成严重威胁, 同时加剧了潜在的社会经济风险, 对人民生命财产安

【作者简介】吴谦谦(1990-), 男, 中国安徽安庆人, 硕士, 工程师, 从事矿山地质工程研究。

【通讯作者】徐嵩(2001-), 男, 中国江苏无锡人, 本科, 从事岩土工程研究。

全形成严峻挑战。因此,做好采空区地表沉降监测是掌握地质灾害的分布和发育程度的基础,也是矿区生产生活的重要保障<sup>[4]</sup>。

早期传统变形监测技术是利用水准仪、经纬仪等仪器进行观测工作,这样的测量方法虽然应用方便、适应性强,但测量周期过长,工作量较大,也不能够进行实时连续监测,具有很大局限性<sup>[5]</sup>。

随着科技的进步,多种先进的监测技术逐渐弥补了传统监测技术的不足。合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术是一项根据合成孔径雷达复数据提取的相位信息获取地表三维信息和变化信息的技术<sup>[6]</sup>,普遍应用于地面沉降监测、滑坡位移、地震形变等地表变形。其优化后的差分干涉合成孔径雷达(Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, D-InSAR)技术、时序 InSAR 技术等更是进一步地提高了测量精度以及有效

解决空间是相关问题。

无人机遥感测量技术也在地质灾害领域得到了愈加广泛的应用,但在矿山地表沉降变形方面应用较少。其能够在短时间段内重复获取研究区影像,通过相关图像处理获取三维影像图,获取同一点在不同时间的高程数据,计算出沉降变形量。无人机遥感还能够与 InSAR 技术相结合,获取精度更高的监测数据。

除了“天”、“空”监测技术外,地表监测技术也是一项重要技术,包括但不局限于全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)技术、三维激光扫描技术等。针对采空区沉降监测,GNSS 技术主要采用静态测量、快速静态测量、实时动态测量三种方法,静态测量主要用于矿区控制点与开采区监测网的坐标联测;快速静态测量主要用于开采前首次观测各监测点坐标的量取;而若需要获取开采后监测点坐标,则要使用实时动态测量。

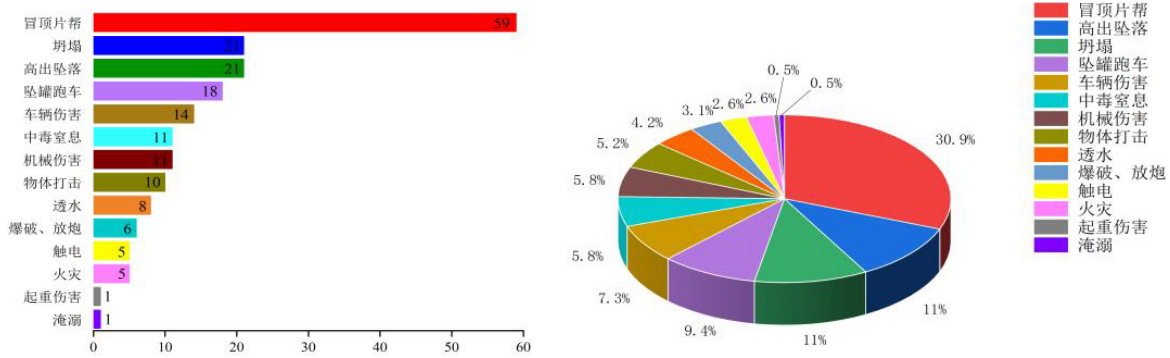


图 1 典型非煤矿山事故类型分布图

## 2 采空区地表沉降变形监测方法的研究现状

采用合理科学的监测技术,掌握采空区地表沉降变形规律,对于矿区安全具有重要意义。沉降监测能够及时跟踪地表沉降变化,识别异常区域,提供预警信息,地面监测是常用的监测手段,其使用全站仪、水准仪测量或多种地面传感器监测手段进行监测<sup>[7]</sup>,测量信息基本准确。但经过多年开挖,部分采空区情况不容乐观,运用传统、单一的监测手段已经无法满足防灾减灾需求,“空天地”一体化监测技术孕育而生。该方法结合 InSAR 技术(天)、无人机遥感技术(空)、GNSS 监测技术(地),对目标区域进行不同纬度的全方位监测,更为精确地掌握沉降变形情况。

### 2.1 基于 InSAR 技术的采空区地表沉降变形监测

#### 2.1.1 InSAR 技术

20 世纪 60 年代末, Rogers 等人首次成功应用了合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术。紧接着, Graham<sup>[8]</sup> 使用 InSAR 技术对地球进行观测,提出合成孔径雷达和干涉仪系统可用于收集全天候的数据来绘制地形图。InSAR 技术能够提取地表发生的微小形变,精度能达到厘米级甚至是毫米级,其获取的数据具有高精度、高分辨率、覆盖范围广等特点<sup>[9]</sup>。国外学者利用其特点首次将 InSAR 技术运用到

滑坡的监测中,得到的监测结果和地面监测的结果较为一致<sup>[10]</sup>。早期对于采空区地表沉降监测,合成孔径雷达差分干涉(D-InSAR)技术运用较为广泛。该技术是对基础 InSAR 技术的一次改进,利用同一地区两幅干涉图像进行差分处理,继而获取地表微量变形,根据重复轨道影像数目的不同可以分为二轨法、三轨法、四轨法,其中二轨法使用频率较高,图 2 为处理流程。

随着人们对监测要求的不断提高, D-InSAR 技术的缺点逐渐暴露出来。由于 InSAR 属于主动微波遥感,需要发射并接受电磁波,因此在传播路径上存在电离层的干扰,大气中水汽云团、本身的轨道误差和机械误差以及系统噪音都会干扰测量精度以及影像效果<sup>[11]</sup>。为了避免空间失相关与大气延迟对传统 D-InSAR 技术测量可靠性的影响,研究人员发展出了永久性散射体合成孔径雷达干涉测量(Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar, PS-InSAR)技术、短基线集成孔径雷达干涉测量(Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar, SBAS-InSAR)技术等时序 InSAR 技术<sup>[12]</sup>。PS-InSAR 技术由 Ferretti<sup>[13]</sup> 等在 2000 年提出并运用于滑坡监测,最终获得了毫米级的平均形变速率。SBAS-InSAR 技术的出现则稍晚一些,由 Berardino 于 2002 年首次提出<sup>[14]</sup>。

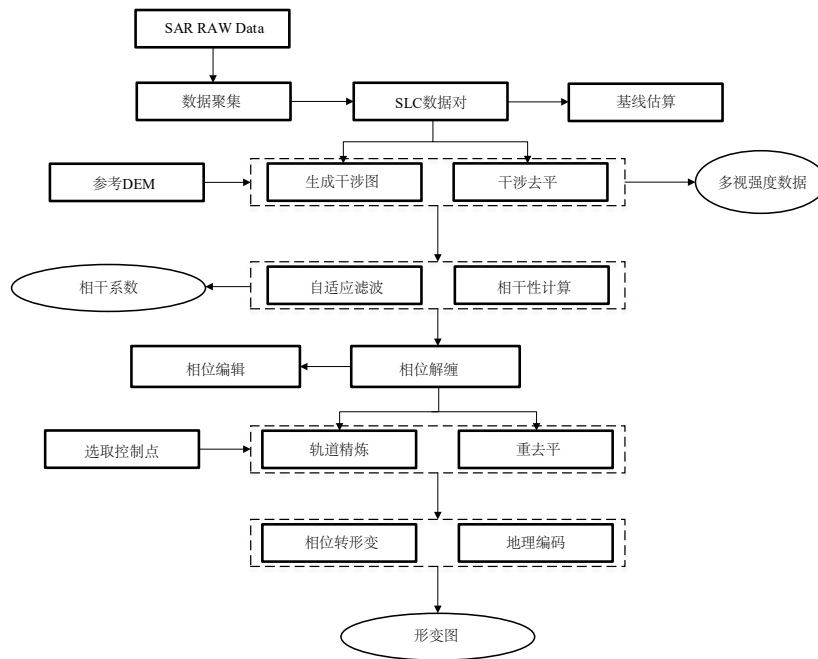


图 2 D-InSAR 处理流程

### 2.1.2 InSAR 技术应用实例

董娟<sup>[15]</sup>等采用双轨 D-InSAR 技术在矿区进行地表沉降监测，其监测结果与实际监测结果基本符合。针对老采空区沉降监测，D-InSAR 能够快速获取微小沉降变形数据，监测结果帮助反演出了矿井地下开采空间的动态发展过程<sup>[16]</sup>。Fan<sup>[17]</sup>等利用一种加权总体最小二乘法确定 GNSS（全球导航卫星系统）数据与 D-InSAR 数据之间的分段线性映射，发现在大倾角沉降情况下，优化后的数据比常规 D-InSAR 监测数据更加可靠和准确。

时序 InSAR 技术被广泛用于监测矿区地面沉降。与传统方法相比，PS-InSAR 技术在提高直观性、整体性以及预测性方面有着显著优势，研究人员通过数值模拟方法对 PS 技术获得的监测结果进行验证，结果表明两者所得沉降区域大致相同，进一步证明了 PS-InSAR 技术可以为采空区地表沉降监测提供支持<sup>[18]</sup>。李博<sup>[19]</sup>等利用 SBAS-InSAR 监测方法对红柳林煤矿采空区进行了地面沉降监测，监测结果表明工作面发生了明显沉降，且符合沉陷规律，有效证明了该技术能够在在矿区开采沉陷监测中得到应用。在对上述两种时序 InSAR 技术进行对比分析后发现，两种技术监测结果基本一致，而 SBAS 技术获取数据的精度更高<sup>[20]</sup>。

## 2.2 基于无人机遥感技术的采空区地表沉降变形监测

### 2.2.1 无人机遥感技术

无人机遥感技术是一种具有高精度、智能化、自动化等特点的应用技术<sup>[21]</sup>，其将无人机和先进的无人驾驶飞行、遥感传感器等技术结合<sup>[22]</sup>，在采空区沉降监测方面应用广泛。

无人机对采空区进行航拍，主要是为了快速收集地形地貌等相关信息，从而获取特定时间或者特定空间分辨率的

数据。垂直摄影是无人机航拍的基础技术，拍摄前要先确定监测范围，在四周及中间布设像控点，通过无人机自带软件进行航线规划，包括飞行高度、飞行速度、影像重叠度等参数的设置<sup>[23]</sup>，航拍结束后，将图像导入 Pix4Denterprise、MapMatrix 等软件进行处理，获取数字正射影像图 (DOM) 和数字表面模型 (DSM) 等基础空间地理信息数据。

倾斜航空摄影测量技术是目前无人机航拍时运用最多的技术之一，摄影时，摄影设备以倾斜的角度朝向地面，获取具有三维效果的倾斜摄影影像<sup>[24]</sup>。相较于传统的垂直摄影，倾斜摄影能从多个角度进行拍摄，获取更为精确的地面信息<sup>[22]</sup>。此外，倾斜摄影还具有更高的分辨率，当相机的倾斜角度越大，同一地物在不同角度下的影像像素数目越多，分辨率也就越高<sup>[25]</sup>。

### 2.2.2 无人机遥感技术应用实例

在矿山采空区沉降监测领域中，单独使用无人机遥感技术监测的实例并不多。郑维龙<sup>[26]</sup>等利用无人机遥感技术迅速捕捉地表裂痕及地表崩溃趋势，及时发现、治理大型煤矿地表沉降问题。胡华宗<sup>[27]</sup>利用不同阶段无人机遥感数据，精确掌握了塌陷值与地面沉降规律，塌陷值与实测塌陷值基本一致，证明了无人机辅助监测地面塌陷的可靠性。

## 2.3 基于 GNSS 技术的采空区地表沉降变形监测

### 2.3.1 GNSS 技术

GNSS 通过接收卫星向地面发射的电磁波信号，获取监测点的三维坐标，从而获得监测点的位移。在监测采空区沉降变形时，主要是在工作面上方布置走向和倾向观测点定期进行观测，获取观测点的时序沉降数据，在此基础上反演得到矿区开采沉陷参数，并研究监测区域的沉降规律<sup>[28]</sup>。GNSS 监测一般通过自动化监测系统实现，该系统主要由硬

件系统和软件组成,其工作示意图如图4所示。当沉降量达到预警值时,系统发出预警,以便提前做出预防措施<sup>[29-31]</sup>。

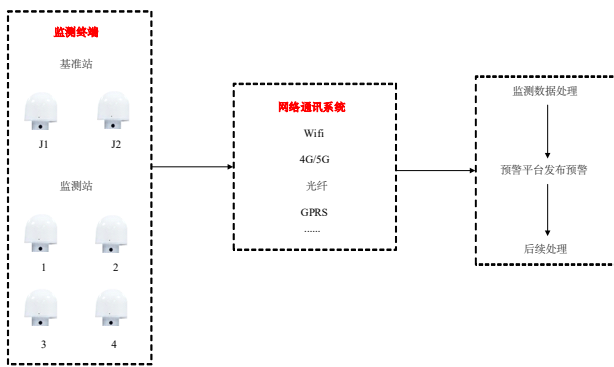


图3 GNSS 监测系统工作示意图

### 2.3.2 GNSS 技术应用实例

早在上世纪80年代,GNSS技术就应用于地表形变、滑坡、地质灾害等领域的监测工作<sup>[32]</sup>。Matsushima<sup>[33]</sup>在1992年研究发现了GNSS技术能够达到厘米级精度。朱成章<sup>[34]</sup>利用GNSS技术开展了区域构造沉降监测,发现研究区域普遍存在构造沉降现象,其研究成果验证了GNSS技术在大范围地面沉降监测中的工程适用性,为区域性地质稳定性评估提供了新的技术路径。王洪永<sup>[35]</sup>等利用GNSS自动化监测设备对某采煤沉陷区进行了地表形变监测,得到了地表形变分布规律,并根据监测数据发现该区域采空区形成年代越早,沉降情况越稳定。Wang<sup>[36]</sup>利用GNSS精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)技术进行了滑坡监测,通过研究发现,PPP技术的监测精度可以达到毫米级别。PPP技术是一种基于传统GNSS静态测量发展出的测量手段,与传统GNSS控制测量相比,PPP技术测量时除截面基点外,没有单独的控制点,减少了平面控制点的数量。此外,由于精密单点定位不需要同时观测多个GNSS,运行效率大幅提高<sup>[37]</sup>。

### 2.4 基于多技术融合的采空区地表沉降变形监测

为了更加全面地监测分析采空区地表形变,研究人员提出了融合多种InSAR技术进行监测,分别采用DInSAR-PS-Stacking和SBAS-PS-InSAR两种方法对形变监测结果进行分析、对比<sup>[38]</sup>,两种方法各有优点但也存在缺陷,DInSAR-PS-Stacking具有强大的沉降中心监测能力;SBAS-PS-InSAR在慢速小变形监测方面表现良好,但对沉降中心的监测不足。通过双阈值法进行融合,结果表明通过多种方法的比较、融合获得的变形信息可以更好地监测和分析矿区地表变形<sup>[39]</sup>。

无人机遥感技术由于自身的特点,单独使用监测效果较为一般,因此常与其他技术结合使用。Liu<sup>[40]</sup>等为了解决煤矿开采地表沉陷的问题,提出了时序无人机摄影测量结合激光雷达的矿区沉陷监测新方法,在监测最大下沉值方面取得了较高的精度。Zhang<sup>[41]</sup>等将D-InSAR与无人机摄影测量

相结合,通过两种监测数据优势互补,实现开采沉陷区的高精度监测。

## 3 结论与展望

### 3.1 结论

矿区地质灾害在中国频频发生,合理高效地对矿区采空区沉降变形进行监测是避免矿区地质灾害的重要一环。本文从空天地三个方面对采空区沉降变形监测技术进行了概括性总结,对InSAR技术、无人机遥感技术、GNSS监测技术、三维激光扫描技术的发展现状、基本原理和优缺点等方面进行了阐述,得出了以下结论:

(1) InSAR技术测量精度在理想状态下可达到毫米级,但由于空间失相关和大气影响,易产生测量误差。而时序InSAR技术对解决上述问题有较好效果。

(2) 无人机遥感技术精度不如InSAR与GNSS,且受天气影响较大,同时仅适用于小范围监测,但却能够避免云层的影响,解决了InSAR技术的难点,与其他技术结合使用能使监测结果更为准确。

(3) GNSS技术能够实时监测,测量精度也可达到毫米级,但易受到地面障碍物影响以及站点选择自由度低,且后期数据处理较为复杂。

### 3.2 展望

为实现对采空区沉降变形更为精准地监测,为防灾减灾工程提供发展新方向,现有如下展望:

(1) 单项监测技术已经日趋完善,但劣势也逐渐凸显,两项或多项监测技术相融合的一体化监测已成为研究重点,但如何融合多项技术,做到既能大范围监测,又能降低甚至避免天气、环境等外界因素的影响需要进一步研究。

(2) 监测结束后的数据处理一直是重中之重,目前面临数据量大、处理周期长等难点,未来可以与机器学习领域有所结合,既快速又准确地获取变形模型。

(3) 本文就监测技术展开了研究,并未涉及预警、响应等后续阶段,未来采空区防灾减灾应构建监测-预警-响应-处置等阶段的防灾体系。

### 参考文献

- [1] 陈立根, 韦阳诚, 刘国锋. 探讨矿区地质灾害的常见类型与预防对策[J]. 世界有色金属, 2023(21): 193-195.
- [2] 梅楠, 李健, 王珂. 近十年非煤矿山典型事故特征及原因分析[J]. 中国安全生产, 2022, 17(05): 50-51.
- [3] 陶秋香. PS-InSAR关键技术及其在矿区地面沉降监测中的应用研究[D]. 山东: 山东科技大学, 2011.
- [4] 殷跃平, 张作辰, 张开军. 我国地面沉降现状及防治对策研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005(02): 1-8.
- [5] 王晓华, 胡友健, 柏柳. 变形监测研究现状综述[J]. 测绘科学, 2006(02): 130-132+9.
- [6] InSAR技术在淮南矿区地面沉陷监测中的应用[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.

- [7] 俞江, 文亦举, 鹿鸣, 等. 基于PS-InSAR技术的矿山区域时序沉降特征研究[J]. 工业安全与环保: 1-7.
- [8] Graham L C . Synthetic interferometer radar for topographic mapping[J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(6): 763-768.
- [9] Wasowski J, Bovenga F. Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives[J]. Engineering Geology, 2014, 174: 103-38.
- [10] Achache J, Fruneau B, Delacourt C. Applicability of SAR Interferometry for Monitoring of Landslides[J]. Ers Applications, 1996, 383(383): 165.
- [11] 姚佳明. 基于InSAR技术的贵州省西部煤矿采空区调查研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- [12] Osmanoğlu B, Sunar F, Wdowski S, et al. Time series analysis of InSAR data: methods and trends[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 115: 90-102.
- [13] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 2000, 38(5): 2202-2212.
- [14] 周凯. 基于SBAS-InSAR的典型采油区地面沉降规律研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2021.
- [15] 董娟, 柯飞, 牛昆, 等. 双轨D-InSAR技术在矿区地表沉降监测与分析[J]. 能源技术与管理, 2024, 49 ( 01 ) : 1-6.
- [16] 王远坚, 齐麟, 姜岳, 等. 基于D-InSAR技术的金矿老采空区下沉监测与位置反演[J]. 金属矿山, 2019, ( 10 ) : 68-73.
- [17] Fan Haodi, Lian Xugang, Yang Wenfu, et al. Mining large-gradient subsidence monitoring using D-InSAR optimized by GNSS[J]. The Imaging Science Journal, 2021, 69(1-4): 207-218.
- [18] 卢欣奇, 李学峰, 张勤斌, 等. 基于PS-InSAR技术的老采空区地表沉降监测与分析[J]. 中国矿业, 2019, 28 ( 04 ) : 104-110+114.
- [19] 李博, 张雨欣, 白喜成, 等. 红柳林煤矿采空区地面沉降InSAR监测与分析[J]. 中国矿业, 2023, 32 ( 08 ) : 55-62.
- [20] 韩玉杰. 基于PS-InSAR与SBAS技术的矿区地面沉降监测研究[D]. 山东: 山东建筑大学, 2019.
- [21] Gao J J, Yan Y S, Sheng X P, et al. Application of UAV remote sensing in geologic hazards survey along the project of west-east gas transmission[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(6): 126-129.
- [22] 徐靓, 程刚, 朱鸿鹄. 基于空天地内一体化的滑坡监测技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58 ( 09 ) : 98-111.
- [23] 黄海峰, 易武, 张国栋, 等. 引入小型无人机遥感的滑坡应急治理勘查设计方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37 ( 1 ) : 99-104.
- [24] 魏琪. 基于无人机倾斜摄影的实景三维建模关键技术研究[D]. 四川: 中国民用航空飞行学院, 2024.
- [25] 王卫敏. 无人机倾斜摄影技术在测绘工程中的实施与应用[J]. 江苏建材, 2024 ( 01 ) : 104-105.
- [26] 郑维龙, 杨芳. 无人机遥感技术在采煤地面塌陷监测中的应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024 ( 15 ) : 175-177.
- [27] 胡华宗. 基于无人机遥感技术的矿井地面塌陷综合监测[J]. 能源与环保, 2022, 44 ( 09 ) : 85-89.
- [28] 寇迎超. 基于InSAR与GNSS技术协同监测的山区地表开采沉降规律研究[D]. 河南: 华北水利水电大学, 2023.
- [29] 任学锋, 黄科伟, 李营作. GNSS监测技术在露天矿边坡监测预警中的应用[J]. 露天采矿技术, 2023, 38 ( 04 ) : 46-48+52.
- [30] 王社光, 杨志强, 王立杰, 等. 采空区地表沉降智能监测与预警系统研究及应用[J]. 现代矿业, 2023, 39 ( 04 ) : 132-134+139.
- [31] 崔春晓, 朱自强, 杨光轩, 等. 基于GNSS技术的排土场边坡监测及稳定性研究[J]. 中国矿业, 2020, 29 ( 03 ) : 94-99.
- [32] 李强. 基于空天地数据集成的甘肃金川矿区地表沉降监测[D]. 四川: 西南科技大学, 2020.
- [33] Matsushima T, Takagi A. GPS and EDM monitoring of Unzen volcano ground Deformation[J]. Earth, Planets and Space, 2000, 52(11): 1015-1018.
- [34] 朱干章. 江汉一洞庭湖平原区构造沉降GPS监测的试验与研究[J]. 全球定位系统, 2004 ( 6 ) : 2-6.
- [35] 王洪永, 陈冲. 基于GNSS曲江-尚庄采煤陷区地表变形监测研究[J]. 江西煤炭科技, 2023 ( 01 ) : 114-117+120.
- [36] Wang G Q. Millimeter-accuracy GPS landslide monitoring using Precise Point Positioning with Single Receiver Phase Ambiguity (PPP-SRPA) resolution: a case study in Puerto Rico[J]. Journal of Geodetic Science, 2013, 3(1).
- [37] 栾元重. 地表移动 GPS 实时监测技术[J]. 测绘工程, 2000, 9 ( 3 ) : 33-34.
- [38] 董旭. 基于InSAR的矿区地表形变监测与分析[D]. 内蒙古: 内蒙古工业大学, 2023.
- [39] Chen Y J, Dong X, Qi Y L, et al. Integration of DInSAR-PS-Stacking and SBAS-PS-InSAR Methods to Monitor Mining-Related Surface Subsidence[J]. Remote Sensing, 2023, 15(10): 2691.
- [40] Liu Jibo, Liu Xiaoyu, Lv Xieyu, et al. Novel Method for Monitoring Mining Subsidence Featuring Co-Registration of UAV LiDAR Data and Photogrammetry[J]. Applied Sciences, 2022, 12(18): 9374.
- [41] Zhang Yafei, Lian Xugang, Ge Linlin, et al. Surface subsidence monitoring induced by underground coal mining by combining DInSAR and UAV photogrammetry[J]. Remote Sensing, 2022, 14(19): 4711.