

华北平原区煤矿采空塌陷精细化监测技术方法研究

——以永城某煤矿山为例

李再兴^{1,2,3}, 徐伟^{1,2,3}, 侯坤颀^{1,2,3}, 范忻^{1,2,3}

(1. 河南省地质局矿产资源勘查中心, 郑州 450012;

2. 河南省天空地遥感智能监测工程技术研究中心, 郑州 450006;

3. 河南省自然资源天空地遥感智能监测研究科技创新中心, 郑州 450006)

摘要: 目前塌陷区监测方法有多种, 而单一监测方法无法满足多元化数据的需要, 以华北平原区永城某矿山地面塌陷监测为例, 结合该地区的地质环境条件, 采用多种监测技术方法系统对某煤矿山进行精细化监测, 即采用常规的水准测量方法监测重点地段(小区域), 采用 GPS 连续运行参考站实时地监测重点采面, 采用 D-INSAR 技术监测全区, 从而获得矿区大范围、小区域、实时采面的多目标空间监测数据, 为管理部门和矿山企业做好应对策略和风险管控提供了数据支撑, 也为同类矿山开展地面塌陷监测工作提供了参考依据

关键词: 华北平原; 地面塌陷; 精细化监测

中图分类号: TD167; P642.26; P694 **文献标识码:** A

STUDY ON FINE MONITORING TECHNIQUE AND METHOD OF COAL MINE GOAF COLLAPSE IN NORTH CHINA PLAIN ——TAKE A COAL MINE IN YONGCHENG AS AN EXAMPLE

LI Zai-xing^{1,2,3}, XU Wei^{1,2,3}, HOU Kun-jie^{1,2,3}, FAN Xin^{1,2,3}

(1. Mineral Resources Exploration Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450012, China;

2. Henan Province Sky and Earth Remote Sensing Intelligent Monitoring Engineering
Technology Research Center, Zhengzhou 450006, China;

3. Science and Technology Innovation Center of Sky and Earth Remote Sensing Intelligent Monitoring
Research of Natural Resources in Henan Province, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: At present, there are many monitoring methods for subsidence areas, however, a single monitoring method cannot meet the needs of diversified data. Taking ground collapse monitoring of a mine in Yongcheng, North China Plain as an example, Combined with the geological conditions of the area, a variety of monitoring techniques and methods are adopted to carry out fine monitoring of a coal mine. That is to use conventional leveling methods to monitor key areas (small areas), real-time monitoring of key mining areas by GPS continuous operation reference station, Using D-INSAR technology to monitor the whole area. In this way, multi-objective spatial monitoring data of large range, small area and real-time mining face can be obtained. It provides data support for management departments and mining enterprises in coping strategies and risk management and control, it also provides a reference for similar mines to carry out ground surface collapse monitoring.

Key words: north China plain; ground surface collapse; fine monitoring

目前,用于地面塌陷监测方法比较多,有水准仪水准测量^[1]、全站仪测量、GPS测量、InSAR监测等多种方法,这些方法在实际监测中都发挥了一定的作用,尤其D-InSAR技术在区域地表微小形变监测方面应用越来越广泛^[2],其具有全天候、全天时、高精度、连续空间覆盖等特点被广泛应用到地表形变监测方面^[3]。

我国目前矿区地面塌陷的监测主要以地面调查或常规的水准仪、全站仪等手段为主,受外界因素影响极大,精度不高,监测手段单一,缺乏统一标准,监测数据可比性和共享性受到限制^[4];尽管D-InSAR技术在地表形变监测方面具有传统技术手段难以比拟的优势,但是时空相关和大气效应这两项因素严重影响其测量精度^[2],另外如何更好地控制其监测的及时性和较大形变量监测的准确性,还得进一步研究和实践。本文就永城的某煤矿,开展多种方法精细化监测,以获得多目标塌陷空间数据,为矿山解决诸多问题,更好地服务于主管部门和矿山企业的多种需求。

永城位于华北平原腹地,矿产资源丰富,现已发现能源矿产、金属矿产、非金属矿产17种,其中能源矿产主要是煤。多年来,煤炭资源大量开采,造成了诸多采空塌陷变形区域,据统计^[5],永城市主要自1986年以来,近30a不同权属的9个煤矿矿山开采引发采空区地面变形达25个区域,地面塌陷和地裂缝变形破坏影响面积累计约157.88 km²。然而随着煤矿开采面积的扩大,城市因为采煤形成地面塌陷压力还在不断加大,矿山地质环境保护任务艰巨而繁重^[6]。

永城市是平原区,人口、村庄居住相对密集,大面积的地面塌陷严重影响了当地百姓的生命财产安全,做好采空区的塌陷监测预测,及时为政府部门和矿山企业做好应对策略和风险管控建议显得尤为重要。

1 研究区概况

1.1 地形地貌

研究区井田位于黄淮冲积平原的东部,地势较为平坦开阔,总的地势西北高,东南低,坡降1/4 500~1/6 000,地面标高32~34 m,相对高差2 m左右。该井田内第四系广泛覆盖于新近系之上,厚度约106.68 m,与下伏新近系上新统整合接触。

1.2 地层岩性

永城煤田属华北地层区,鲁西分区徐州小区。煤田全被第三、第四系厚层松散沉积物所覆盖。井

田内钻孔穿见地层自下而上为:中奥陶统(O₂)、中、上石炭统(C₂、C₃)、二叠系(P)和新生界,其中石炭-二叠系为主要含煤地层。

1.3 浅层地下水特征

浅表部为第四系全新统孔隙潜水含水段,埋深在30~50 m以内,砂层1~3层,以粉细砂为主,厚1.2~19.59 m,平均8.27 m。呈北西-南东向带状分布,单层厚度变化大,分布不稳定。单位涌水量0.87~2.28 l/s.m,渗透系数53.66~123.2 m/d,水化学类型HCO₃-Ca.Mg型。

隔水层为致密的粘性土,夹粉土,与砂层交互沉积。底部粘性土厚1.1~44.24 m,平均12.56 m,与下部含水层相隔。据调查,监测区一般地下水埋深3~5 m,汛期地下水位会更浅。

1.4 煤矿概况

以永城市某矿山为例,该矿山为国有大型矿山,煤层赋存于石炭-二叠系含煤岩系,其中下二叠统山西组(二煤)和下石盒子组地层(三煤)含可采煤层及局部可采煤层,含煤性较好,是本区主要含煤地层。煤层埋深330~1 080 m。

采矿时先行开采二₂煤层,后期开采三煤组。矿井自2003年投产生产以来,二₂煤层开采至-800 m水平。矿山共划分若干个采区、多个工作面,多个采区可能会同时开采。

该矿山多年开采,形成了大面积采空塌陷区,其分布之广,除近年来已经治理的区域外,矿区仍然存在部分塌陷区,分散分布在矿山多个区域不同位置,因开采时间的先后不同,稳沉的时间不一,总体还未到治理时间。该矿区塌陷中心下沉深度一般0.5~4 m,平均约为2.3 m。

矿山企业和管理部门迫切需要及时掌握矿山以往塌陷区和正在开采的采面塌陷下沉情况。

2 监测方法的选择

根据自然资源部门要求结合矿山企业需求,采用小范围重点开采区域四等水准测量+重点采面GPS连续运行参考站动态监测+全区D-INSAR监测技术相结合的精细化测量技术,为矿山企业提供有重点、实时的及大区域的监测数据。

2.1 重点区域水准测量

结合矿山已有的控制点、矿山范围及开采的实际情况,选理9个控制点建立D级GPS控制网(图1),控制矿山监测区域。首级平面控制点(起算点、工作基准点)在河南省地质信息连续采集系统(HNGICS)的支持下,进行D级GPS静态测量。

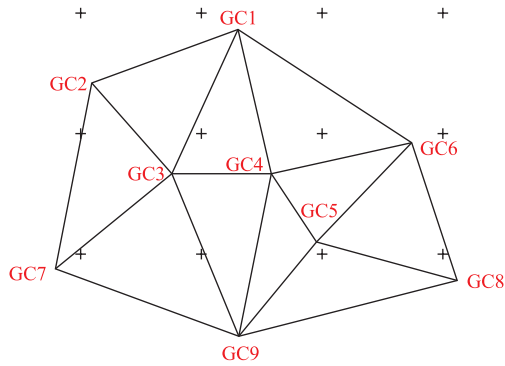


图1 矿区D级控制网布设图

一般矿山测量采用流程为:D级GPS控制测量、地面监测点选埋、监测点联测与四等水准测量、日常RTK监测。在后来实践中,日常RTK监测不再进行,保留在重点监测区域采用四等水准测量进行地面塌陷的日常监测。监测频率1次/月,变形显著时,加密监测。

2.2 GPS连续运行参考站动态监测

依托全球卫星导航系统(GPS)或北斗系统,采用连续运行参考站监测方法,建立三座连续运行参考站(由基础底座+镀锌钢管+接收机+电源线、数据线+太阳能板+避雷针等设备构成)。以建立在煤矿生活区的楼顶稳定点(JZ01)作为基站,对两个新采面(BD01和BD02监测站所在位置)进行连续观测(图2),主要观测矿区开采工作面随开采工作的推进,其地面发生下沉量变化,每日监测1次,观测值每15日进行一次累积。其中BD02监测站布置在重点监测区范围内。

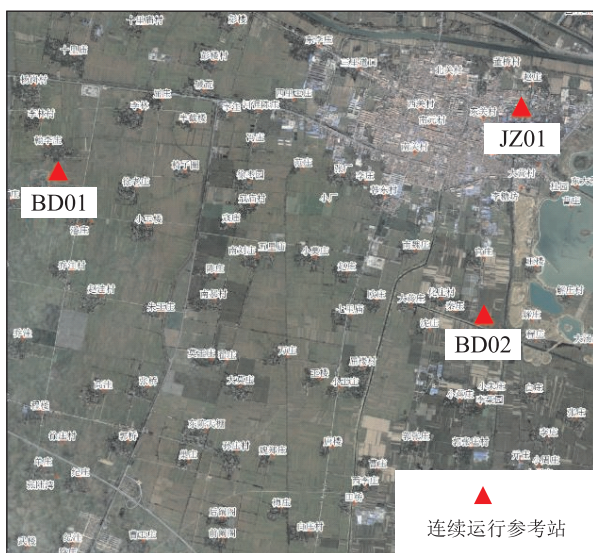


图2 连续参考站点位分布图

具体技术流程如图3所示。

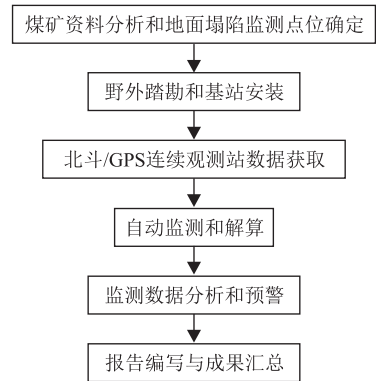


图3 GPS/北斗系统连续参考值监测技术路线图

2.3 D-INSAR 监测

采用两轨D-INSAR方法对矿区地面塌陷进行监测,总体分为三步:第一步干涉处理一对跨越形变期的SAR影像,得到包含形变信息的干涉相位。第二步利用已知的研究区数字高程模型(DEM)和SAR成像参数反演干涉相位,而该反演的干涉相位是不含形变信息,也不受大气效应及其他噪声的影响^[7]。第三步是将第一步和第二步获得的干涉相位进行二次差分处理,就从干涉相位中去除了地形相位,得到只表征地表形变信息的相位,从而可计算地表形变量^[7,8]。

其中对SAR原始数据处理是利用瑞士GAMMA遥感公司开发的GAMMA软件,处理后可形成数字高程模型和地表形变图等数字产品;数字高程模型采用的是SRTM3,分辨率精度为90 m,3×3弧秒的DEM。

根据相位和塌陷形变之间的对应关系,经过转换就可得到相对于解缠起始点在视线方向(LOS向)的塌陷形变信息,再根据几何关系转化为垂向的下沉值。转化后将D-INSAR获得的塌陷结果信息导入GIS软件中,并结合矿区边界等其他空间信息,可以实现对地面沉陷区域的精确分析^[9]。

自该矿山监测以来,共利用62景Sentinel-1A和RADARSAT-2卫星雷达SAR数据,运用两轨D-InSAR方法,共获得了3个时间段的采煤塌陷区监测数据,本次分析的时段为2017年12月20日至2018年12月15日。

3 地面塌陷监测结果与分析

3.1 水准测量结果与分析

依据矿山开采实际,选取的重点区监测面积约1 km²,该区有多个开采工作面,各自开采时间先后顺序不同。布点方式是沿开采巷道掘进的方向和横

向分别布置监测点,监测点间距 100~200 m。通过监测,2018 年度塌陷最深的点为 CJ129 点,位于往年已经开采的 2 506 综采面上,塌陷深度达 0.854 m,该点位为本年度新开采位置;其他点位均有不同程度的下沉量,但都小于此点位。这跟塌陷区布点的间距和工作面掘进进度及时间有关。同时由于该区水准监测点比较分散,而不能全面反应全区每一处的塌陷量。

3.2 自动化监测结果与分析

GPS/北斗连续运行参考站获取的地表位移数据由上海华测公司提供的连续运行监测站管理系统 HCmonitor2.0 自动解算统计,并自动提交到网页端,可以由拥有权限的用户查看下载。该系统可提供 3 个值,除了深度值之外,还有平面 X,Y 值,南北方向正值为北方,东西方向正值为东方。

通过监测,2017 年度 BD01 因为煤矿开采而产生了明显的位移,沉降 620.0 mm;而 2018 年度下沉 406.25 mm。2017 年 BD02 号点相对位移较小,沉降 22 mm;而 2018 年度沉降 1 231.2 mm。

这是由于 BD01 监测站位于开采的工作面正上方,由于工作面的掘进,下沉量很显著;而后逐步离开此点位置开采,下沉量逐步降低。BD02 号监测站位于重点监测区内,2017 年此点在开采工作面外侧,下沉量明显偏小;到 2018 年度到达此点正下方开采,下沉量明显增大。

经过分析,2018 年度 BD02 号监测站监测的下沉深度大于同期重点区水准点监测深度,主要因为未同时监测开采量较大的同一点位,经过核实,BD02 号监测站监测的下沉深度接近真实值。

3.3 D-INSAR 监测结果与分析

该矿山利用 D-INSAR 监测已开展多年,本次选取为 2017 年 12 月 20 日至 2018 年 12 月 15 日时间段的 5 m 分辨率的 RADARSAT-2 卫星数据数据和部分分辨率为 5 m×20 m 的 Sentinel-1A 解译结果进行同期对比研究。

矿区共解译出塌陷量大于 10 mm 的 5 个塌陷区(图 4),地面塌陷总面积 9.51 km²,其中一个位于矿区东南部 E 区,塌陷量大于 10 mm 的面积有 2.81 km²,最大塌陷量为 784 mm;一个矿区位于的南部 D 区,塌陷量大于 10 mm 的面积有 1.69 km²,最大塌陷量为 352 mm;一个矿区位于的西南部 C 区,塌陷量大于 10 mm 的面积有 2.31 km²,最大塌陷量为 821 mm;一个位于矿区东北部小戚庄附近 B 区,塌陷量大于 10 mm 的面积有 0.85 km²,最大塌陷量为 339 mm;一个位于矿区西北部,塌陷量大于

10 mm 的面积有 1.84 km²,最大塌陷量为 530 mm。

重点监测区及其 BD02 监测站均位于东南部 E 区内,而监测的最大的深度与 D-INSAR 监测结果有一定偏差。相同的位置由 BD02 监测站监测的塌陷深度与其接近,但有偏差。这是否与选择的数据分辨率有关系,需要进一步研究。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 采用多种方法综合监测技术中,在一定的监测面积内,能很好地发挥水准测量精度高且相对便宜的优势。但如果在大的尺度范围内,一是水准测量成本将会上升,二是受外界干扰的因素较多,很容易造成测量误差,数据的准确性就降低;而且监测点较为分散,难以大范围、全区域追踪塌陷区地面沉降全过程。

(2) 采用北斗系统/GPS 连续运行参考站动态监测,是一种不间断地进行全天候自动监测,数据精度较高,能够实时传输数据,可以及时地预警预报。但这也是一种离散点式的监测,可以满足一定的需求,但在大面积矿山采空塌陷区监测中,很难控制全区,而且建站和维护成本较高。

(3) D-INSAR 监测可以获得某一地区连续的地表形变信息,且覆盖范围大,精度高;本次 D-INSAR 监测采煤塌陷区地面塌陷的精度在±5 cm 之内,对于永城矿区地面塌陷监测来说,监测精度在合理范围之内,可以满足地面塌陷监测需要。

但在监测实践中发现,矿山塌陷深度较大的情况下(一般超过 1 m),该 D-INSAR 监测效果就会减



图4 D-INSAR 技术地面塌陷量等值线图

低,不能很好地分析出深塌陷区域地表形变量,而常规水准测量能满足单个深塌陷点测量。其次是 D-INSAR 数据是按一定时段来采集的,而按此监测结果的及时性还得进一步研究。

(4) 本次将传统地面监测技术(水准测量)、GPS 连续参考站和 D-INSAR 技术相结合,各方法相互补,对地面塌陷区域进行分块处理,由点及面构建采煤塌陷区监测方法,充分发挥三者各自的优势,获得多目标空间数据,既能满足地面塌陷监测工作的时效性,又能整体掌握矿区大范围的地表变形情况,更提高了地面塌陷监测的准确性。对丰富和完善采煤塌陷区地面塌陷监测技术流程,提高监测精度与可靠性,为矿山企业和主管部门及时地做好应对策略和风险管控工作,具有十分重要的意义。

4.2 建议

(1) 为了提高传统测量的精度,起算点应该是更高级别的 GPS 点;为防止控制点受塌陷的影响,布点时候应避免塌陷区域及其受影响地段;如果发现存在影响,应及时纠正。并建议至少 1 a 对控制点进行一次重新联测,以保证数据的精确性。

(2) 应加强与矿方、主管部门的沟通,合理地布置监测点,达到点面兼顾,来满足矿山生产和主管部门监管的多方面需要。

(3) 以需求为目的,可选择多种测量技术综合监测,以获得大面积、小区域深塌陷实时全方位的监

测数据,可为同类矿山监测提供参考以及满足安全智能绿色矿山发展的需要。

(感谢同事汪宝存高工、郭凌飞及吕超迪工程师对本项目作出的贡献!)

参考文献

- [1] 李战军,史俭峰,周波.地面塌陷监测方法与数据分析[J].测绘技术装备,2015,17(3),79-80+60.
- [2] 刘晓菲,邓喀中,范洪冬,等. D-InSAR 监测老采空区残余变形的试验[J].煤炭学报,2014,39(3),467-472.
- [3] 李楠,王磊,池深深,等.矿区地表沉降的 D-InSAR 监测方法[J].金属矿山,2017,(10),23-27.
- [4] 梅金华,典型金属矿山地面塌陷监测技术研究:以冷水江锡矿山地区为例[J].中国矿业,2016,25(7),92-96.
- [5] 郭文秀,方士军,戴立乾,等.河南省永城市 1:5 万矿山地质环境调查评价成果报告[R].郑州,河南省国土资源科学研究院,2017.
- [6] 李再兴,徐伟,贾红军,等.永城市采煤塌陷区矿山地质环境治理“十三五”规划(2016~2020年)[R].郑州:河南省地质矿产勘查开发局测绘地理信息院,2015.
- [7] 祁晓明. PS-InSAR 技术在西安地区的变形监测研究[D].西安:长安大学,2009.
- [8] 戴可人.融合新一代卫星 SAR 数据的地形与形变信息提取模型与方法[D].成都:西南交通大学,2017.
- [9] 范忻,侯坤颖,杨扬,等.河南正龙煤业有限公司城郊煤矿矿山地质环境监测报告(2017年12月~2018年12月)[R].郑州:河南省地质矿产勘查开发局测绘地理信息院,2018.

作者简介:李再兴(1981—),汉族,男,安徽安庆人,硕士 河南省地质局矿产资源勘查中心高级工程师,从事工程地质、水文地质与环境地质的勘测与研究。E-mail:95233784@qq.com