doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.02.021

基于SBAS-InSAR技术的阳城地区采空区地表沉陷分析

熊　威[1]，孙志杰[1]，郝晓阳[2]
（1. 山西省交通科技研发有限公司 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室，山西 太原 030032；
2. 山西省煤炭地质物探测绘院 资源环境与灾害监测山西省重点实验室，山西 晋中 030053）

摘　要：为了探究山西省阳城地区煤矿采空区影响范围和地表历史形变过程，为工程建设提供避让依据，采用SBAS-InSAR技术对该地区2019年1月至2020年7月间的地表形变进行监测，分析地表沉陷的原因，利用同期水准监测结果验证了InSAR结果的可靠性。结果表明，SBAS-InSAR技术能及时监测到黄土地区采空沉陷区的动态变化过程，开采深度、停采时间和掘进位置是影响该地区地表沉陷变化的主要原因。

关键词：SBAS-InSAR；采空区；地表沉陷；黄土；阳城
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）02-0103-05

Surface Subsidence Analysis of Goaf in Yangcheng Area Based on SBAS-InSAR Technology

XIONG Wei[1], SUN Zhijie[1], HAO Xiaoyang[2]
(1. Key Lab of Highway Construction & Maintenance Technology in Loess Region, Shanxi Transportation Technology Research & Development Co., Ltd., Taiyuan 030032, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Resources, Environment & Disaster Monitoring, Coal Geological Geographic Exploration Surveying & Mapping Institute of Shanxi, Jinzhong 030053, China)

Abstract: In order to explore the influence range of goaf and the historical deformation process of historical surface deformation processes in the Yangcheng Area of Shanxi Province, and provide a basis for engineering construction, we used the SBAS-InSAR technology to monitor the surface deformation of this area from January 2019 to June 2020, analyzed the possible causes of surface subsidence, and verified the reliability of InSAR results by using the monitoring results of the same period. The results show that the SBAS-InSAR technology can timely monitor the dynamic change process of subsidence area in the loess area. The mining depth, stop time and excavation location are the main reasons that affect the subsidence changes in the area.

Key words: SBAS-InSAR, goaf, surface subsidence, loess, Yangcheng

山西省作为传统的煤炭资源大省，为国家的发展建设提供了源源不断的能源供应，同时也形成了近5 000 km^{2}的采空区，其中沉陷区约3 000 km^2，给采空区周边居民生活、公路运营、工程建设等造成了较大的安全隐患。为了对采空区的影响范围和发育程度进行有效评估，有必要采取一种高效便捷的观测手段对采空区进行识别和监测。传统地表沉陷监测方法主要有GNSS、水准仪、全站仪等[1-3]，它们均是以点为单元进行测量，效率低下，无法覆盖全区，需要耗费大量的人力财力。合成孔径雷达干涉测量（interferometric synthetic aperture radar，InSAR）技术作为一项新型空间对地观测技术，具有大面积、全天候、连续、高精度、高空间分辨率等优点，由此衍生而来的差分干涉测量（D-InSAR）技术在地震同震形变[4]、城市地面沉降[5]、矿区地表沉陷[6]等方面做了广泛的研究，取得了一定的成效。由于D-InSAR容易受到大气效应、DEM误差、基线误差等因素的影响，其中，大气效应对雷达信号传播产生的延迟，在中纬度地区一年内的影响区间是20 cm，是最主要的误差源[7]。为了消减各项误差对监测结果的影响，在此基础上发展了多时相InSAR技术（MT-InSAR）来进行高精度形变监测，永久散射体（PS-InSAR）和小基线集（SBAS-InSAR）是其中最具代表性且广泛使用的两种方法，二者均具有毫米级精度，且能回溯地表历史形变过程，在采空区沉陷监测与成因分析[8-9]和形变预测[10-11]方面发挥了重要作用。PS-InSAR方法基于一景主影像与其余辅影像配准后差分，获取PS点的位移时间序列，适用于相干性较强的城镇地区，且对数据量要求较

收稿日期：2021-09-27。
项目来源：山西交控集团科技项目（19-JKKJ-3，19-JKKJ-16，20-JKKJ-2）；山西省科技成果转化引导专项二批项目（201604D132035）。

高，SBAS-InSAR技术克服了PS-InSAR因选取一幅影像作为公共主影像而引起的部分干涉图相干性较差的不足，同时降低了对SAR数据的需求量，运算效率较高，适用性更广。

本文针对山西省阳城地区煤矿采空区现状，利用SBAS-InSAR技术对2019年1月至2020年7月间共25景Sentinel-1A影像进行处理，根据时间序列形变结果分析黄土地区采空区沉陷的动态变化过程，以及引起沉陷变化的直接因素，为黄土地区采空区的特征识别及危险性分析提供技术支持。

1 SBAS-InSAR技术

SBAS-InSAR处理方法最早由Berardino[12]提出，首先根据同一地区不同时刻（t_0、t_1、$t_2\cdots t_n$）的$N+1$幅SAR影像组成M个干涉像对，其中$(N+1)/2\leqslant M\leqslant N\times(N+1)/2$。由公式（1）可知第$k$个差分干涉像对上的第$x$个像元的解缠相位组成部分有DEM误差相位$\delta\phi^k_{x,\text{topo}}$、地形形变相位$\delta\phi^k_{x,\text{def}}$、大气相位差值$\delta\phi^k_{x,\text{atm}}$和噪声相位$\delta\phi^k_{x,\text{noise}}$，其中地形形变相位可用公式（2）表示。

$$\delta\phi^k_x=\delta\phi^k_{x,\text{topo}}+\delta\phi^k_{x,\text{def}}+\delta\phi^k_{x,\text{atm}}+\delta\phi^k_{x,\text{noise}} \tag{1}$$

$$\delta\phi^k_{x,\text{def}}=\phi^j_{x,\text{def}}-\phi^i_{x,\text{def}}=-\frac{4\pi}{\lambda}\cdot\left[d_x(t_j)-d_x(t_i)\right] \tag{2}$$

式中，$d_x(t_i)$、$d_x(t_j)$为时刻t_i、t_j地面点x在卫星视线向上相对于时刻t_0的累积形变量，且$d_x(t_0)=0$，$\phi^i_{x,\text{def}}$、$\phi^j_{x,\text{def}}$为经过控制点校正后的解缠相位。对于每个像元x可生成M个观测方程，其线性形变模型为：

$$\boldsymbol{A}\phi=\delta\phi \tag{3}$$

式中，$\phi=\left[\phi(t_1),\phi(t_2),\cdots,\phi(t_n)\right]^{\mathrm{T}}$，为不同时刻对应的未知形变相位；$\delta\phi=[\delta\phi_1,\delta\phi_2,\cdots,\delta\phi_M]^{\mathrm{T}}$，为不同时刻形变相位组成的差分干涉像对；$\boldsymbol{A}$为$M\times N$阶矩阵。

为防止公式（3）解得的形变相位结果不连续且没有物理意义，用相邻时刻的平均相速度来代替不同时刻的未知相位，将式（4）代入式（3）可得到相位速度的最终表达式（5）。

$$v=[v_1=\frac{\phi_1-\phi_0}{t_1-t_0},\cdots,v_N=\frac{\phi_N-\phi_{N-1}}{t_N-t_{N-1}}]^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{B}v=\delta\phi \tag{5}$$

当$M\geqslant N$时，通过最小二乘法即可求解v；当$M<N$时，$\boldsymbol{B}$为秩亏矩阵，可利用SVD方法对矩阵$\boldsymbol{B}$进行分解，进而求得v的最小范数二乘解。最后对v在时间维度上积分即可得到相应时刻的累积形变量。

2 测区概况与数据处理

2.1 测区概况

测区位于山西阳城县北部，晋运高速、济阳高速在这里交汇（图1），其中在晋运高速阳城段两侧分布有大大小小几十个采煤区，开采时间从20世纪80年代至今，高速南侧大部分开采时间早于2010年，北侧大多为近年来形成的采空区，部分矿区甚至下穿高速。该地区主要为黄土丘陵地貌，地层从上往下主要为第四系全新统人工堆积层（Q4 ml）素填土，全新统冲洪积层（Q4 al+pl）粉质黏土、碎石土，第四系上更新统坡洪积层（Q3 dl+pl）黏质黄土和二叠系上统（P2）泥岩、砂岩。

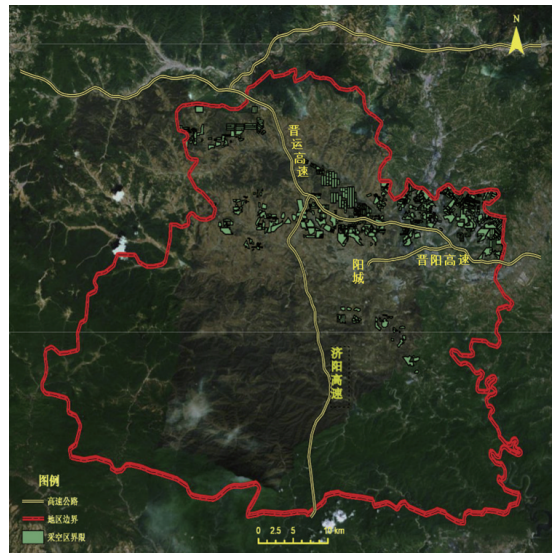


图1 测区地理位置图

2.2 数据处理

本文利用2019-01-08—2020-07-01的欧洲空间局Sentinel-1A卫星数据对采空区的地表形变进行监测，数据详情如表1所示，并配合使用与影像数据相匹配的精密轨道数据，其位置精度优于5 cm。外部DEM使用的是美国宇航局提供的SRTM-1，其分辨率为30 m，高程精度约为10 m。上述数据的使用能最大限度的减少DEM误差和轨道误差对干涉图及解缠结果的影响。

本文利用GMTSAR软件中SBAS模块对沟东隧道

表1 影像信息表

传感器	时间	类别	极化方式	模式	平均入射角	影像时间间隔
Sentinel-1A	2019-01-08—2020-07-01	升轨	VV	IW	≈36°	24 d

上覆边坡的SAR数据进行处理，该软件具有开源、自动处理、易于绘图等优点[13]，在震后大范围地表形变监测方面取得了较好的效果[14]。由于测区位于丘陵地带，季节性的灌木丛生，为了减少时空失相干的影响，增加相干点数，设置时间基线阈值为180 d，空间基线阈值为最大基线长度的30%，组合形成的影像连接图如图2所示，共形成163对有效干涉像对，每幅影像至少与3幅以上的影像产生干涉，网型健壮性较好。相干性阈值设置为0.1。在经过影像裁剪、配准、干涉图生成、去地形相位、相位解缠、形变反演、地理编码等一系列步骤之后最终得到累积形变结果如图3所示。其中距离向与方位向多视比为5∶1，成图分辨率为20 m；解缠方法为经典的最小费用流法，解缠分解等级设置为1；最终选取的有效控制点数量为30个，均远离采空区且均匀分布于全图；初始反演模型选择较为稳定的线性模型；轨道精炼选择3次多项式拟合方法。

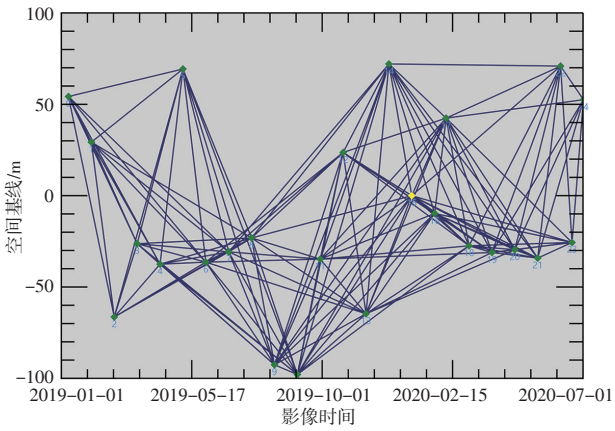


图2　影像连接图

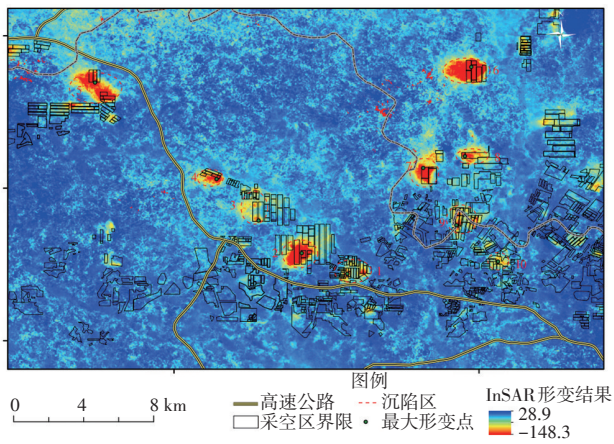


图3　累积形变量图

3　结果验证与精度评价

为了验证SBAS-InSAR技术监测结果的精度，利用前期布设在6#采空区周边的水准线路进行对比分析。该条水准线路沿东西向的乡村公路布设，包含1个基准点KZ1和12个监测点（JC1~JC12），基准点位于曲堤村，点位稳定。线路总长3.3 km，平均点位间距0.3 km，按照二等精密水准的精度要求测设，监测频率1次/月，均在每月上旬完成。由于InSAR技术得到的是卫星视线向上的形变，水准监测得到的是垂直方向形变结果，两者之间有如下转换关系：

$$d'_{\mathrm{LOS}} = d_H \cdot \cos\theta \tag{6}$$

式中，θ为卫星视线向（LOS）与地表法向的夹角；d_H为精密水准得到的地表垂向监测结果。将水准监测结果转换到卫星视线向，并根据基准点沉降位移值做校正，再与InSAR结果做对比（图4），并根据公式（7）计算两者之间的相关性。

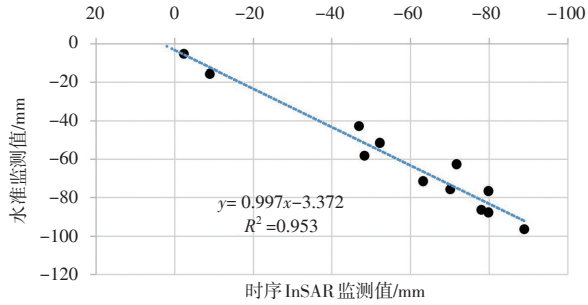


图4　水准与时序InSAR数据之间相关性

$$r_{12} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{7}$$

通过式（7）计算结果可以看出两类监测数据的线性相关程度较高，相关系数R^2为0.982，表明二者具有较强的一致性。为进一步验证时序InSAR数据的可靠性，将2种手段得到的监测点位累积形变量进行对比分析，结果如图5所示。

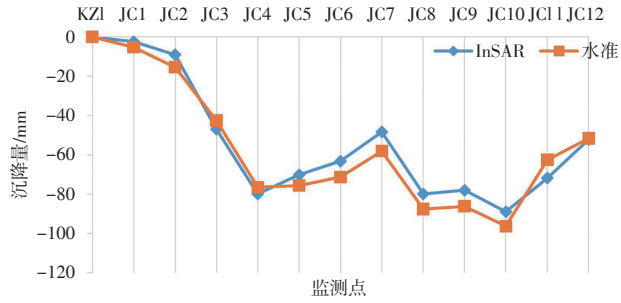


图5　水准测量结果与时序InSAR形变结果对比

从图5中可以看出水准测量结果与时序InSAR形变结果在不同点位的最大形变差值为+9.8 mm，最小形变差值为−0.5 mm，平均差值为3.0 mm，中误差为6.7 mm。造成二者之间差异的主要原因有：①InSAR监测结果的像元分辨率为20 m×20 m，无法在空间位

置上与水准点保持一致；②2种监测方式获取的监测结果时间上不能完全同步，有数天的差异；③时序InSAR结果仍残存有大气、DEM、轨道误差。从整体趋势上来看，二者变化基本保持一致，时序InSAR技术监测精度小于1 cm，具有较高的可靠性。

4 结果分析

4.1 时序结果分析

从图3可以看出晋阳高速、安阳高速两旁分布有大大小小十几个沉陷区，均位于采空区正上方，其中面积较大、形变量级>50 mm、距离公路2.5 km以内的沉陷区有6个，1号沉陷区边缘已经侵入公路界线，须谨防扩大。从2019年1月至2020年7月间最大累积形变量达到14.8 cm，位于6#采空区范围内。选取10个典型沉陷区的最大形变点做进一步的时序分析（图6），发现1、2、10号点形变有逐渐变缓的趋势，其他7个沉陷区仍处于匀速或加速下沉的趋势中。对沉陷点正上方的采空区开采时间进行统计分析，结果如表2所示。

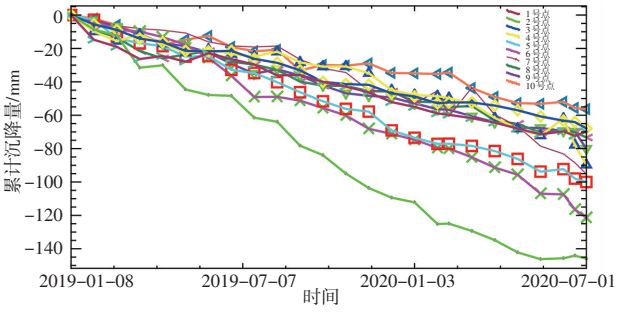


图6 沉降时序曲线

表2 采空区情况统计表

编号	开采时间	停采时间	最大采深/m	所属公司
1#	2007-05	2019-12	318	白沟煤业
2#	2009-04	2019-12	247	大宁能源
3#	2008-06	至今	330	大宁能源
4#	2017-04	至今	305	宇昌煤业
5#	2017-04	至今	280	晶鑫煤业
6#	2016-02	至今	262	坪上煤业
7#	2017-05	至今	288	寺河煤矿
8#	2017-05	至今	350	寺河煤矿
9#	2012-03	至今	322	南凹寺煤业
10#	2009-03	2019-12	368	西冯街煤业

上述煤矿的开采方式均采用倾斜长壁采煤法，倾斜角小于10°，回采方式为后退式回采。从表2中可以看出1、2、10#煤矿开采时间较长，初采时间均在2010年前，2019年底局部区域开采完毕，地表沉陷在半年内趋于稳定。3#煤矿初采时间在2008年，采深较大，监测点位于2019年新掘采空区上方，形变趋势较为平缓。4~8#采空区的初采时间为近4 a，形变速率和开采深度正相关，采深越大，形变速率越小，且目前仍在开采中，形变量持续增加，部分点还有加速下沉迹象。9#煤矿初采时间为2012年，监测点位于2020年待采区域内，可以看出从2020年6月开始有加速下沉迹象。

4.2 沉陷区动态变化分析

为了深入分析采煤沉陷区的动态变化过程，以6#、8#沉陷区作为研究对象，绘制不同方向的多个剖面进行分析，其中剖面AA’与6#采空区多个采煤断面掘进方向垂直，剖面BB’与6#采空区掘进方向平行，剖面DD’与8#采空区的掘进方向平行。

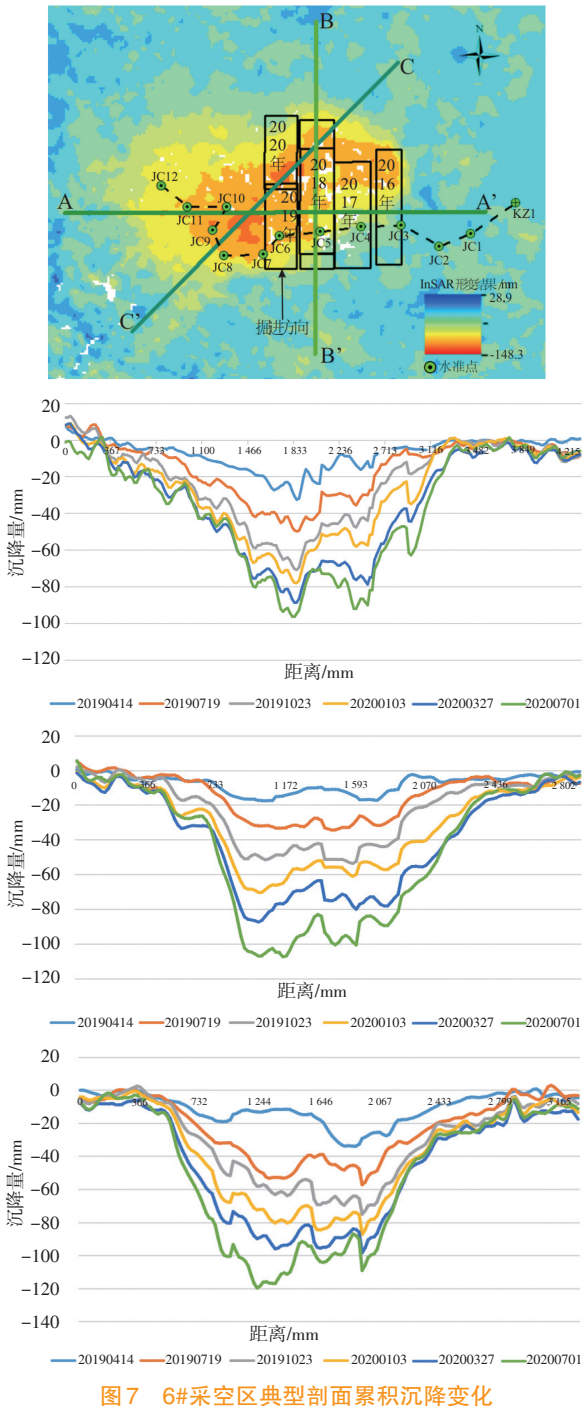


图7 6#采空区典型剖面累积沉降变化

6#采空区包括从东至西多组不同时期的子采空区组成，每个子采空区的掘进方向均为由南至北，采用斜井开拓，走向长壁分层综采，支护方式为支撑掩护式综采支架，采深为320~470 m。为了细致地研究不同时期地面沉陷动态变化过程，判断开采时间和掘进方向与地面沉陷之间的关系，选取3条剖面上间隔一个季度的多期累积沉降量曲线进行分析。

从剖面AA’的沉降曲线上可以看出有3个沉降中心，分别对应2019年、2018年和2017年3个子采空区横断面，开采时间越晚的采空区累积沉降量越大。2016年采空断面由于时间超过2 a，沉降趋势基本稳定。剖面BB’从南向北累积沉降量越来越大，对应的开采时间由2018年年初至年末，初采时间越晚，被记录到的残余形变越大。剖面CC’横跨2个子采空区，沉降曲线上相应有2个沉降中心，且从2019年4—7月第二个沉降中心开始形成，与该区域的开采时间基本一致，在该时间段内第一个沉降中心也有加速趋势，可能为第一个工作面上继续进行分层开采造成的。从以上分析可以看出InSAR结果的沉降剖面上能较好地识别出不同时期采空区的沉降中心，且累积沉降量的变化趋势能清晰反映开采方向、开采时间对地面沉降造成的影响。利用DD’剖面进一步分析开采方向上不同时间节点不同点位的沉降速率变化。8#采空区包括从南至北多组不同时期的子采空区，其中DD’剖面位于2019—2020年采空区上，开采方式采用斜井开拓，长壁开采，采深350~500 m。沿掘进方向依次选取E、F、G 3个监测点位进行沉降速率分析，E点从2019年2月开始沉降速率由小于10 mm/a急速变大，F点从2019年4月份开始沉降速率迅速增加，G点的沉降速率峰值则出现在2019年7月份，最大沉降速率分别达到68 mm/a、79 mm/a和78 mm/a。沉降速率超过50 mm/a的时间周期为2~3个月，其他时间段内沉降速率会有小幅波动，可能为上覆岩层稳定性发生改变或是周边煤矿采掘造成的影响。由于煤矿开采造成的地表沉陷响应较快，不同点位的沉降速率峰值基本能够代表掘进位置变化。

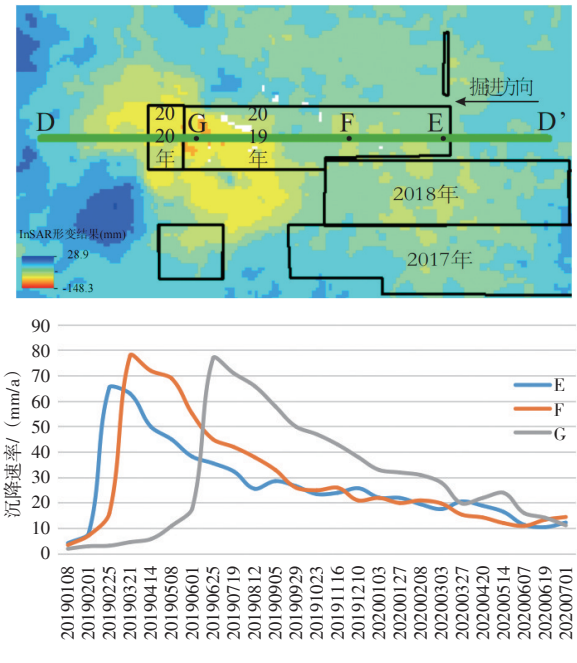


图8　8#采空区不同点位沉降速率图

5　结　论

本文采用时序InSAR监测技术，基于2019年1月至2020年7月间共25景Sentinel-1A卫星数据，对山西阳城地区的采空区发育情况进行调查研究，并利用同期水准监测结果进行精度验证。可得出如下结论：

1）阳城北部分布有10个较大规模的采空沉陷区，监测周期内视线向最大沉降量达到14.8 cm，现采空区形变沉陷趋势较为剧烈，停采后沉陷趋势明显变缓。

2）InSAR监测结果剖面能清晰识别采煤断面，以及不同时刻采煤引起的地表沉陷变化，根据地表沉降峰值还能判断出采煤实时掘进位置。

3）InSAR技术可应用于黄土地区采空区沉陷识别及监测，为盗采、超采等隐蔽违法违规行为调查提供参考依据。

参考文献

[1]　王利，张勤，范丽红，等. 北斗/GPS融合静态相对定位用于高精度地面沉降监测的试验与结果分析[J]. 工程地质学报，2015，23(1)：119-125

[2]　尤晓青，赵瑞斌，陈聚忠，等. 基于水准测量的天津滨海新区高程模型构建及其地面沉降过程分析[J]. 上海国土资源，2020，41(1)：80-84

[3]　宋中华，田慧，宋帅. Trimble S9/S9 HP全站仪在铁路顶管施工路基面的精密沉降监测中的应用[J]. 测绘通报，2020(6)：153-155

[4]　熊威，罗三明. 九寨沟Ms7.0地震的InSAR观测及断层破裂研究[J]. 大地测量与地球动力学，2019，39(5)：452-457

[5]　Ding X L，Liu G X，Li Z W，et al. Ground Subsidence Monitoring in Hong Kong with Satellite SAR Interferometry[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing，2004，70(10)：1 151-1 156

（下转第118页）