

doi: 10.6046/zrzyg.2021289

引用格式: 麻学飞, 张双成, 惠文华, 等. 山西省临汾市矿区地表形变 InSAR 大范围探测与监测[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(3): 146–153. (Ma X F, Zhang S C, Hui W H, et al. InSAR – based large – scale detection and monitoring of the surface deformation in Linfen mining areas, Shanxi Province[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(3): 146–153.)

# 山西省临汾市矿区地表形变 InSAR 大范围探测与监测

麻学飞<sup>1,2</sup>, 张双成<sup>1,2</sup>, 惠文华<sup>1</sup>, 许强<sup>1</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054; 2. 地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054)

**摘要:** 矿区持续开采造成的地面沉陷会对环境带来巨大的破坏, 如何快速获取大范围区域内矿区的位置和地表形变成为矿区监测亟待解决的问题, 为此利用合成孔径雷达干涉测量 (interferometry synthetic aperture Radar, InSAR) 技术对山西省临汾市开展矿区沉陷大范围探测和监测研究。首先, 通过差分合成孔径雷达干涉测量方法 (differential interferometric synthetic aperture Rader, D – InSAR) 处理分析 12 景 Sentinel – 1A 升轨数据, 对研究区域进行了矿区沉陷灾害大范围探测; 然后利用小基线集 (small baseline subset, SBAS) – InSAR 处理了不同轨道共 432 景 Sentinel – 1A 升轨数据, 对普查出来的重点区域进行监测。研究结果发现, 在临汾市共探测出 105 处沉陷区, 沉陷区均处于临汾断陷盆地两侧的山体中。进一步对重点沉陷区域进行时序形变监测, 发现多处沉陷区均处于持续形变过程中, 且形变量级较大, 最大形变速率达  $-381 \text{ mm/a}$ , 对地表生态环境和基础设施带来了巨大的破坏。通过光学影像寻找到了沉陷区附近的开采点, 验证了基于 InSAR 技术的大范围探测与监测方法的可靠性, 研究结果可为临汾市矿区沉陷灾害防治提供重要依据。

**关键词:** 大范围探测; 差分干涉测量技术; 小基线集技术; 形变监测

**中图法分类号:** TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097 – 034X(2022)03 – 0146 – 08

## 0 引言

煤炭作为我国的支柱能源, 关系到国家经济的命脉, 需要不断地进行开采, 这势必会形成采空区。采空区上部岩层发生断裂、弯曲等形变, 会造成采空区沉陷, 破坏当地生态环境, 威胁居民的人身财产安全<sup>[1–2]</sup>。因此对矿区进行大范围探测和动态监测具有重要的研究意义。水准测量、全球定位系统 (global positioning system, GPS) 等方式是传统的矿区地表形变监测手段, 但由于这些方法监测成本高、工作量大等原因, 难以进行长期监测, 且所获监测结果时空分辨率低, 难以反映真实的矿区形变过程<sup>[3–5]</sup>。

合成孔径雷达干涉测量 (interferometry synthetic aperture Radar, InSAR) 作为一种高精度的测量手段, 利用相位差获取研究区地表形变信息, 具有监测范围大、效率高、分辨率高的特点, 几乎不受云雾的

影响, 成为了矿区地表监测的有效手段<sup>[6–7]</sup>。差分合成孔径雷达干涉测量方法 (differential interferometric synthetic aperture Rader, D – InSAR) 可获取到 2 景合成孔径雷达 (synthetic aperture Radar, SAR) 影像覆盖期间形变体表面的微小形变信息<sup>[7]</sup>, 从而实现形变体进行监测, 处理数据量小, 可以快速获取目标区域的形变信息。Ge 等<sup>[8]</sup>利用 D – InSAR 技术对 Appin, Westcliff 和 Tower 煤矿区地表形变进行监测, 所获监测结果精度可达厘米级; 龙四春等<sup>[9]</sup>利用 D – InSAR 与 GPS 集成实现了对资兴唐煤矿区三维形变监测, 并对测量结果进行集成与内插, 验证了 2 种监测结果的一致性。但是 D – InSAR 技术难以获取目标区域时序变化过程, 且在实际应用过程中常常受到时空去相干、大气延迟等影响<sup>[10–11]</sup>。而时序 InSAR 弥补了 D – InSAR 技术的不足, 在一定程度上解决了时空失相干、数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 误差、大气延迟造成的影响, 监

收稿日期: 2021 – 09 – 13; 修订日期: 2022 – 03 – 17

基金项目: 国家重点研发计划项目“膨胀土滑坡和工程实时监测方法和早期预警技术”(编号: 2019YFC1509802)、国家自然科学基金项目“星载 GNSS – R 遥感解译土壤湿度理论及算法研究”(编号: 42074041)、陕西省自然科学基金项目“地基 GNSS 遥感解译积雪参数研究”(编号: 2020JM – 227) 共同资助。

第一作者: 麻学飞 (1995 – ), 男, 硕士研究生, 主要从事 InSAR 矿区形变监测研究。Email: 516832020@qq.com。

通信作者: 张双成 (1979 – ), 男, 博士后, 副教授, 博导, 主要从事卫星导航与定位、GNSS 遥感、地质灾害监测预警等研究。Email: shuangcheng369@chd.edu.cn。

测精度可达厘米级甚至毫米级<sup>[12-13]</sup>。永久散射体测量技术(permanent scatters InSAR, PS-InSAR)利用影像上存在的永久散射点来替代整幅影像上的像素点,通过永久散射点的形变来呈现目标区域的形变<sup>[14]</sup>,但是只适合小形变速率、小范围的形变,无法很好地适用于沉陷区大范围探测与监测;小基线集(small baseline subset, SBAS)-InSAR能以更高的时空密度来提取到相干点目标,其形变结果更加明显、直观<sup>[15-16]</sup>,是目前矿区沉陷监测最主要的方法之一。沙永莲等<sup>[17]</sup>使用SBAS-InSAR技术对新疆哈密砂墩子煤田矿区进行监测,发现了一个沉降漏斗,时序结果显示沉降漏斗先线性下沉后逐渐趋于稳定;李达等<sup>[18]</sup>通过对13景Terra SAR-X数据进行SBAS-InSAR技术处理,监测到了陕西榆林某煤矿的地表形变,并提取多个观测点的时序沉降值进行量化分析,结果表明SBAS-InSAR技术可为矿区地表形变监测和分析提供新的监测手段。但是时序InSAR技术对影像的数量有一定要求,处理数据量较大,周期长,无法高效率地对大范围的形变区域进行监测。针对矿区地表形变大范围探测与监测的问题,可以将D-InSAR技术和SBAS-InSAR技术结合起来使用:首先利用D-InSAR技术对目标区域进行大范围探测得到沉陷区位置,再利用时序InSAR技术对目标沉陷区进行时序监测和形变追踪,高效率地完成对目标区域的形变监测。

本文获取了覆盖山西省临汾市全域不同轨道的C波段Sentinel-1A数据,采用联合D-InSAR技术和SBAS-InSAR技术开展临汾市沉陷区的大范围探测和监测工作,总计探测出沉陷区105处,选取其中的2处矿区进行详细分析,并结合光学影像进行验证。

## 1 研究方法

### 1.1 D-InSAR 基本原理

D-InSAR技术通过采用目标区域形变前后两景影像共轭相乘获得干涉图,与DEM模拟相位差分消除地形相位后获取到地表形变信息。但是在D-InSAR用于具体的地表形变监测过程中,由于大气环境和地表形变处于不断的变化的过程,干涉相位会不可避免地受到影响,进而影响到最终的测量结果<sup>[19]</sup>。差分相位表达式为:

$$\varphi = \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noi}}, \quad (1)$$

式中: $\varphi$ 为形变相位; $\varphi_{\text{flat}}$ 为平地相位,可借助精密

轨道数据去除; $\varphi_{\text{topo}}$ 为地形相位,可借助DEM数据模拟地形相位去除; $\varphi_{\text{def}}$ 为地表形变引起的相位; $\varphi_{\text{atm}}$ 为大气延迟相位; $\varphi_{\text{noi}}$ 为随机噪声相位,可采用滤波的方式进行消除。

### 1.2 SBAS-InSAR 原理

小基线技术利用同一轨道重复观测获取到目标区域的SAR影像集,通过设定时空基线将SAR影像集进行分组,形成多个小基线子集,再分别对每个子集内的SAR影像进行差分干涉生成差分干涉图和相干性图,利用平均相干性从相干性图中选取高相干性的像素点,对差分干涉图依次进行相位解缠得到相位序列,联合多个小基线子集的相位序列来预估形变信息。若在一定时间内有 $N+1$ 景SAR影像覆盖目标区域,设定时空基线后可以组合成 $M$ 幅干涉图, $M$ 需要满足<sup>[20]</sup>:

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq \frac{N(N+1)}{2}。 \quad (2)$$

以 $t_0$ 时刻作为初始时刻,则 $t_k$ 时刻的差分干涉相位 $\varphi_{tk}$ 为观察量,其中 $1 < k < N-1$ 。若每个差分干涉图都可以解缠,且忽略地形相位、大气相位、噪声相位,解缠后干涉图相位为:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi(x) &\approx \varphi(t_b, x) - \varphi(t_a, x), \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_b, x) - d(t_a, x)], \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} v(x) T_i, \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $d(t_a, x)$ 和 $d(t_b, x)$ 为 $t_a$ 和 $t_b$ 时刻雷达视线方向上的形变值; $\varphi(t_a, x)$ ,  $\varphi(t_b, x)$ 分别为 $d(t_a, x)$ ,  $d(t_b, x)$ 对应得解缠相位值; $\lambda$ 为波长; $T_i$ 为主辅影像时间间隔; $i$ 为 $N$ 幅影像获取时间段内某一时刻; $v(x)$ 为像元 $x$ 处的形变速率。 $N$ 幅影像可以组成 $M$ 个方程,其方程组的形式为:

$$\mathbf{A}\varphi = \delta\varphi, \quad (4)$$

式中: $\mathbf{A}$ 为 $M \times N$ 的系数矩阵,每一行代表一副干涉影像,每一列代表对应时间上的SAR影像。若 $M > N$ ,且 $\mathbf{A}$ 的秩为 $N$ ,依据最小二乘法估值为:

$$\hat{\varphi} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \delta\varphi, \quad (5)$$

式中 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 为奇异矩阵,存在无数解,可用联合多个小基线采用奇异值分解法求出上式最小范数下的二乘解。

D-InSAR技术和SBAS-InSAR技术2种方法使用的场景不同,根据需求联合2种监测技术实现对于临汾地区矿区的大范围探测和动态监测,技术流程如图1所示。

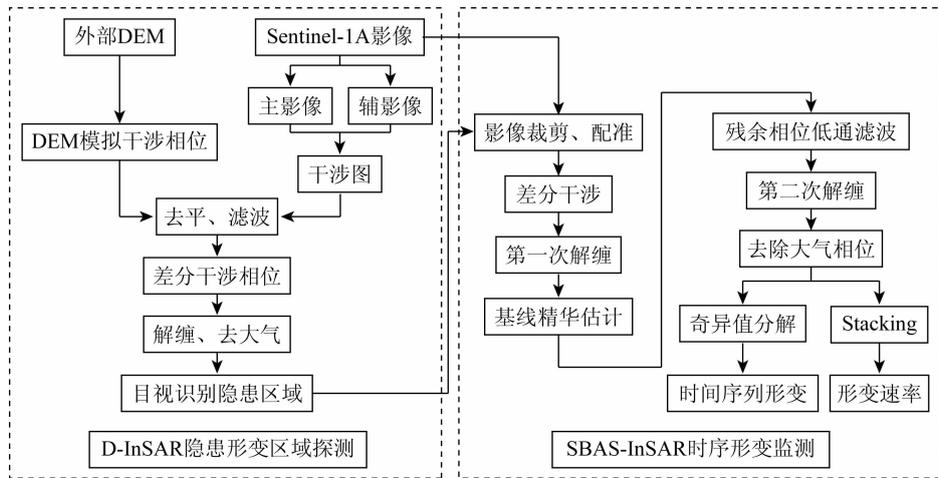


图1 技术流程图

Fig. 1 Technical flow chart

## 2 研究区概况及数据源

山西省临汾市位于  $N35^{\circ}23' \sim 36^{\circ}57'$ ,  $E110^{\circ}22' \sim 112^{\circ}34'$  之间,处于太原、郑州、西安 3 个省会城市连线的中心点,地理区位优势明显,矿产资源丰富;地处属温带大陆性气候,四季分明,雨热同期<sup>[21-22]</sup>;地表多为黄土,土质疏松,夏季多暴雨,地表植被容易遭到破坏。临汾市包含河东煤田北部、霍西煤田中部和沁水煤田西部,煤炭资源丰富,2019 年原煤产量 6 201.6 万 t, 占全省原煤产量的 6.39%。临汾市矿区多分布于临汾断陷盆地山体之中,地表以植被为主,多年的煤炭开采造成地表沉陷严重,容易引发滑坡、地面塌陷等多种地质灾害,迫切需要有效的沉陷区监测手段。

实验选取 432 景不同轨道观测获取的 Sentinel-1A 影像(图 2),其中  $path = 11, frame = 111$  有 103 景,  $path = 11, frame = 116$  有 103 景,时间跨度为 2017 年 3 月 12 日—2020 年 11 月 27 日;  $path = 113, frame = 111$  有 113 景,  $path = 113, frame = 116$  有 113 景,时间跨度为 2017 年 3 月 19 日—2020 年 12 月 28 日。

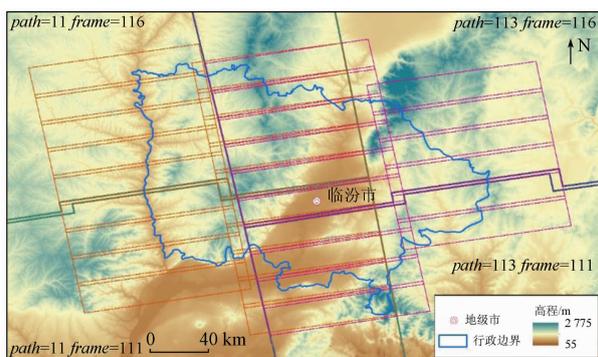


图2 影像和 DEM 覆盖范围

Fig. 2 Image and DEM coverage

影像均为 C 波段,周期为 12 d,模式为升轨, VV 极化,距离向分辨率为 5 m,方位向分辨率为 20 m。DEM 数据为 AW3D30 DEM,分辨率优于 30 m。卫星轨道参数为欧空局提供的 POD (AUX\_POEORB, POD Precise Orbit Ephemerides) 精确轨道参数。干涉雷达处理软件为瑞士 GAMMA 软件。

## 3 数据处理结果与分析

### 3.1 矿区大范围探测

矿区形变具有连续性,受非人为因素的干扰较小,只要在矿区连续沉陷过程的某一时间段内的形变过程被监测到,则认为该区域为沉陷区。本文选取 2017 年末、2019 年初和 2019 年末 3 个时间段共 12 景不同轨道的 Sentinel-1A 影像组成覆盖临汾市全域的 6 组干涉对共 3 个组合(组合 a、b、c)进行大范围探测。较短的时空基线可以在一定程度上减小时空失相干带来的影响,为了保证干涉对具有较高的相干性,提高观测精度,选取影像时时间基线设置为 12 d,空间基线最大值控制在  $\pm 100$  m 以内。

在数据处理过程中,将距离向和方位向的多视比设定为 4:1,地形相位利用外部 DEM 去除,干涉对中存在的噪声采用自适应滤波的方法去除,相位使用奇异值分解法进行解缠,大气相位应用 GACOS 技术去除,最终获取到高质量的解缠图。由于矿区在短时间内形变量级较大,形变相位在解缠图中特征明显,可直接依靠相位特征获取到沉陷区位置,将沉陷区大致范围用矩形框标识出来。由于沉陷区在地理位置上呈现集群式分布,为了后续的数据方便处理将识别结果划分成 6 部分,依次编号为 A—F,结果如图 3 所示。

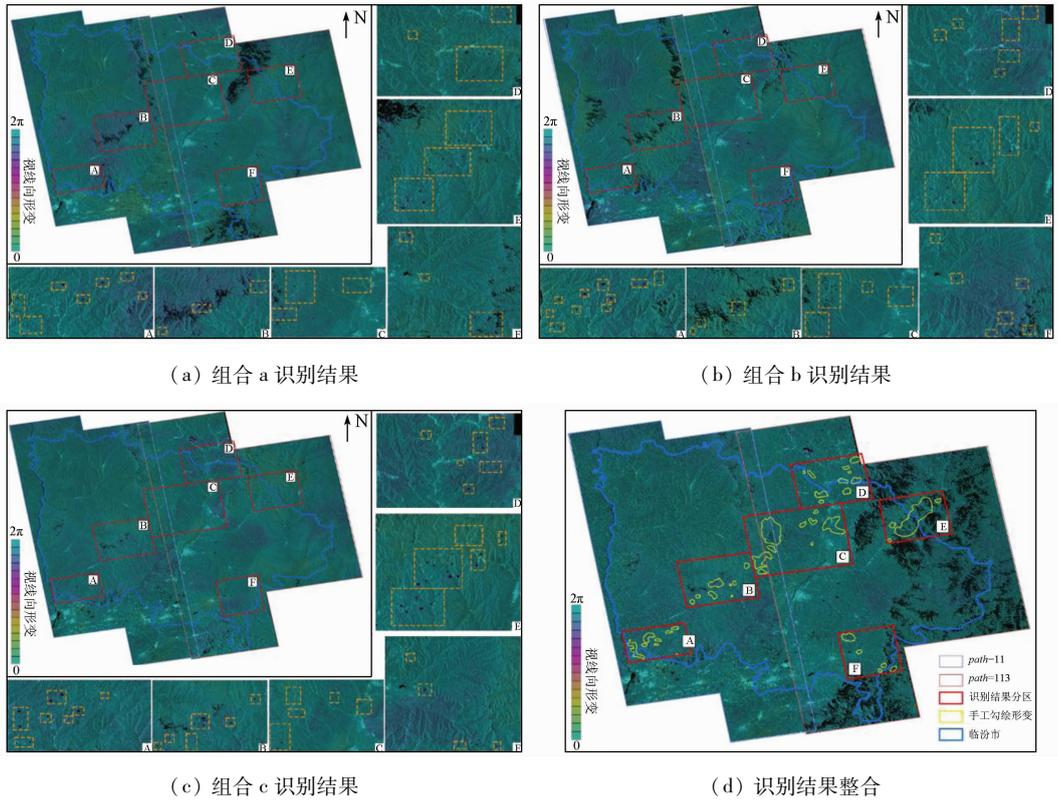


图 3 D - InSAR 解缠图识别结果

Fig. 3 D - InSAR recognition results

图 3(a) — (c) 中黄色虚线为获取到的沉降区的大致位置。图 3(d) 中红色矩形框圈画出来的即为沉陷区, 形变相位表现为由青 - 紫 - 青变化; 黑色的空洞是因失相干而产生的监测结果缺失。造成失相干的原因主要有 2 种: ①因沉陷区形变量过大, 超出了 C 波段的监测能力而产生失相干; ②因植被茂密导致地物介电质常数发生变化而导致的失相干。沉陷区的也存在 2 种状态: ①形变量级较大的沉陷区在解缠结果上表现为中心呈空洞状态, 周围有形变相位环绕; ②形变量级较小的沉陷区表现为紫色或者黄色的形变相位环绕。沉陷区主要分布于临汾断陷盆地两侧的山体中, 沿盆地东西两侧山体走向分布, 呈点状集群分布。分布于盆地中心的附近的沉陷区, 地表植被较少, 具有较高的相干性, 获得结果完整, 易于识别沉陷区; 盆地两侧山体因植被影响造成大面积的失相干, 给沉陷区识别带来了一定的困难。C 区域的沉陷区分布区域面积最大, 数量最多, 后文将着重以 C 区域作为重点进行表述。

### 3.2 矿区时序监测

基于 D - InSAR 识别到的沉陷区位置, 依次对 6 个区域进行 SBAS - InSAR 时序处理, 数据处理详细参数如表 1 所示。2 个轨道公共主影像时间分别为 2019 年 1 月 1 日和 2019 年 1 月 8 日, 将主影像作为统一的基准进行配准并作为时间参考

表 1 数据处理详细参数

Tab. 1 Detailed data processing parameters

参数名称	参数选择
多视比	4: 1
偏移量计算窗口	128 × 128
偏移量多项式参数个数	3
空间基线/m	- 120 ~ 120
时间基线/d	1 ~ 90
滤波窗口	32 × 32
解缠方法	MCF

点, 设定时间基线不少于 90 d, 空间基线不超过 120 m。为了提高结果的精度, 使用强度互相关算法对主辅影像进行配准, 通过设置不同的窗口大小、多项式参数个数等参数提高影像配准精度。通过外部 DEM 去除地形相位, 利用时空滤波方法去除大气误差, 选取高相干性点位作为基准进行相位解缠, 最终获取到 6 个区域垂向的形变速率, 结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 识别所得开采沉陷区范围均在 D - InSAR 监测结果中, 其中灰色线条为手工勾绘的沉陷区边界。本文此次探测出 105 处沉陷区, 总面积达 188.75 km<sup>2</sup>, 其中 7 处与行政界线相交。识别所得沉陷区数量多, 单个沉陷区沉陷面积较小, 部分沉陷区形变量级较大, 多处开采形变速率超过 - 100 mm/a, 可以反映出临汾市开采沉陷情况非常严重, 这足以给当地矿

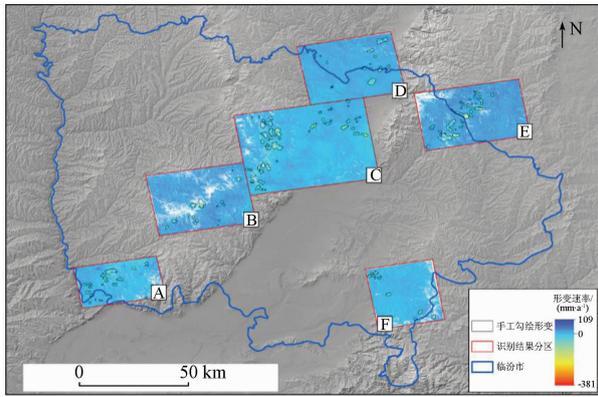
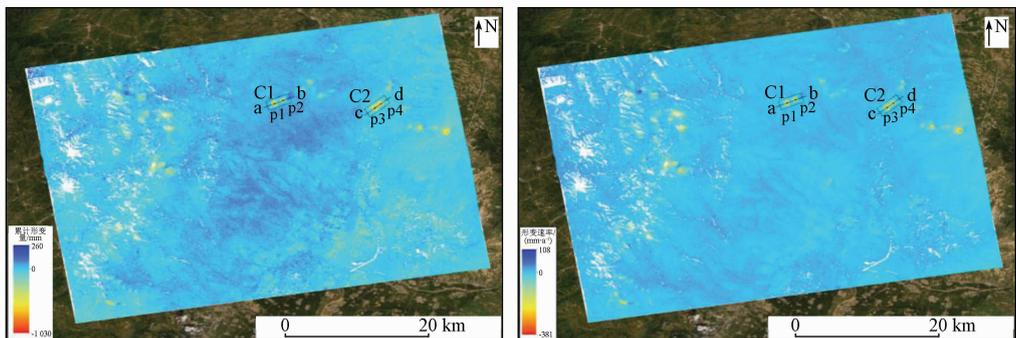


图4 临汾市2017年3月—2020年12月SBAS-InSAR沉陷区形变速率图

Fig.4 Deformation rate map of SBAS-InSAR subsidence area in Linfen City from March 2017 to December 2020

区生态环境造成巨大的破坏。

选取形变量级最大的C区域进行详细分析,获取到的累计形变量和形变速率结果如图5所示。C区域存在43处沉陷区,2017年3月19日—2020年12月28日该区域最大累计形变量为1030 mm,最大形变速率为-381 mm/a。区域右侧植被覆盖较少,影像相干性较高,可以获取到完整沉陷区形变,而左侧区域为山区,植被覆盖率高,白色区域即为影像因植被影响产生失相干所造成的结果缺失。其中C1沉陷区由2个相邻的矿区构成,左侧沉陷区形变量级大于右侧,最大累计形变量分别为922 mm和593 mm。C2沉陷区为单沉陷区,形变轮廓呈现为条带状,沉陷区的轮廓反映出矿区由西南向东北方向不断开采,最大累计形变量为942 mm。



(a) C区域累计形变图

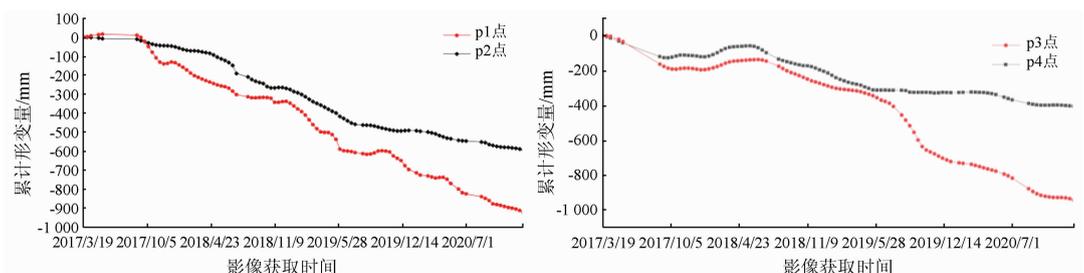
(b) C区域形变速率图

图5 C区域2017年3月19日—2020年12月28日SBAS-InSAR时序监测结果图

Fig.5 Results of SBAS-InSAR time series monitoring from 19 March,2017 to 28 December,2020 in region C

从图6可以看出,C1,C2两个沉陷区均处于不断开采过程中。从形变过程来看,4个点位在矿区开采过程中形变量级在不断增大,形变过程呈现快速沉陷-缓慢沉陷-快速沉陷的周期,以p1点的时序变化表现的最为明显。在2017年5—8月,由于没有获取到有效的干涉对,故时序呈现拟合的直线。p1点整体形变速率最大,形变量总是经历较长时间快速形变到较短时间缓慢形变的周期循环,形变速率的绝对值也是呈大-小-大的周期变化,但是整

体的形变趋势逐渐缓和,最大沉降量为922 mm。p2点整体形变趋势较为平稳,周期性形变特征不太明显,最大沉降量为593 mm。p3点位于C2矿区沉陷中心,p3点的整体形变速率要大于p4点,呈现快速下降-稳定-略微抬升-缓慢下降-快速下降的过程,最大沉降量为942 mm。p4点位于矿区开采沉陷方向的中间位置,与p3点为同一矿区,整体形变趋势与p3相似,最大沉降量为404 mm。



(a) p1, p2点形变时序图

(b) p3, p4点形变时序图

图6 p1, p2, p3, p4时序变化

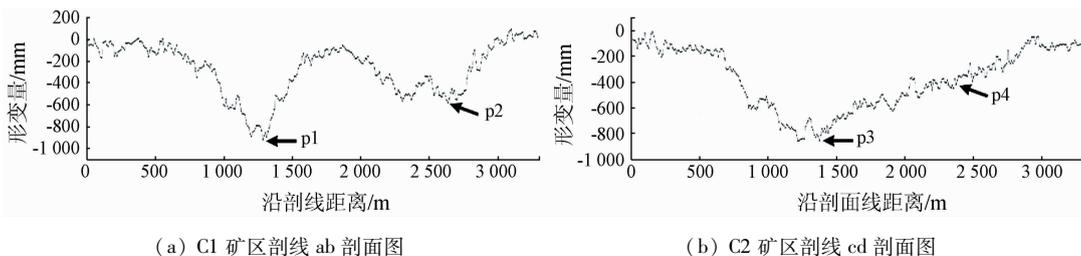
Fig.6 Timing changes of p1, p2, p3, p4

将C1,C2矿区分别沿图6中ab,cd剖面截取剖

面,结果如图7所示。C1矿区有2个沉降漏斗,左

侧的沉降量要大于右侧,2 个沉陷区中间的位置已经有 100 mm 的沉降量,已经成为一个双中心的大型沉陷区。C2 矿区沉陷左侧形变倾角大于右侧,说明矿区开采的方向是沿剖面 cd 方向进行开采,沉降

漏斗中心位于起采区,但是随着开采工作的进行,沉降漏斗中心会逐渐向开采的方向移动,沉陷区轮廓会呈现为条带状。



(a) C1 矿区剖面 ab 剖面图

(b) C2 矿区剖面 cd 剖面图

图 7 重点矿区剖面图

Fig. 7 Key mining area profile

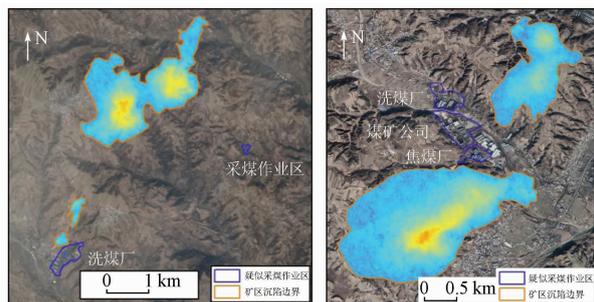
由于没有矿区的实测数据,本文利用 Google Earth 遥感影像数据检验监测结果的一致性。首先采用阈值分割法将 C1, C2 沉陷区边界提取出来,经过多次尝试当阈值设置为 -10 mm/a 时,所获得沉陷区边界效果最好,将矿区边界叠加至光学影像上如图 8 所示。结合光学影像进行分析,2 个矿区均为地下开采,沉陷范围内有建筑物存在,地表分布有大量农田,沉陷面积分别为 1.54 km<sup>2</sup>, 2.87 km<sup>2</sup>。C1 矿区南侧地势平坦,已被开垦为农田,北侧为山地,人工地物较少,中间由一条道路横穿沉陷区,左侧 100 m 附近有一村落,周围发现 2 处疑似采煤作业区。C2 矿区地表起伏较大,但地表已被全部开垦为农田,中间由多条道路穿过,东南侧与小镇相接,东北方向 50 m 有一条国道,北侧分布有 3 个疑似采煤作业区。C1, C2 矿区沉陷边界直接与农田、道路相接,距离住宅不足 100 m,产生的地面沉陷会直接威胁到周围居民的人身财产安全,尤其 C2 矿区,需要持续进行监测。

基础设施带来了巨大的破坏。本文利用 D-InSAR 技术对临汾市沉陷区进行大范围探测和监测结果工作,将探测结果分成了 6 个区域并依次使用 SBAS-InSAR 技术进行时序监测,共发现 105 处沉陷区;将其中 2 处典型沉陷区作为重点区域进一步分析,获取到了该沉陷区的形变演化情况,为后续矿区沉陷灾害防治提供重要依据。通过光学影像发现了沉陷区附近存在疑似采煤作业区,验证了 InSAR 技术大范围探测与监测具有可行性和可靠性。

1) 矿区地表形变具有形变速率快、量级大的特点,会对当地的生态环境造成巨大的破坏,难以通过传统的光学遥感进行探测,InSAR 技术可以极易捕获沉陷区的大量级地表形变,从而实现对研究区沉陷区的大范围探测。

2) 直接利用时序 InSAR 技术对大范围区域进行沉陷区探测具有巨大的挑战性,处理数据量大,工作效率低,结果不稳定。而基于 D-InSAR 技术的大范围探测和 SBAS-InSAR 技术的详细监测的方法可以很快实现对研究区进行层次化的处理,真正做到对大范围区域的高效率监测。

3) 本文基于 InSAR 技术使用 Sentinel-1A 升轨数据对临汾市矿区地表形变进行了大范围探测和监测,识别和监测结果对临汾市矿区形变监测具有较好的参考价值,但是 InSAR 技术在植被覆盖率较高的区域适用性不佳,未来还需要借助其他技术来提高大范围探测和监测结果效率。



(a) C1 矿区遥感解译图

(b) C2 矿区遥感解译图

图 8 沉陷区遥感解译图

Fig. 8 Remote sensing interpretation map of subsidence area

## 4 结语

煤矿开采所造成的沉陷区对地表生态环境和基

志谢: 感谢欧洲太空局在科学数据中心网站公布 Sentinel-1A 卫星雷达影像,感谢日本宇宙航空航天局地球观测研究中心提供 DEM 数据。

## 参考文献 (References):

[1] 刘国林,张连蓬,成 枢,等. 合成孔径雷达干涉测量与全球定

- 位系统数据融合监测矿区地表沉降的可行性分析[J]. 测绘通报, 2005(11): 13-16.
- Liu G L, Zhang L P, Cheng S, et al. Feasibility analysis of monitoring mining surface substance using InSAR/GPS data fusion[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2005(11): 13-16.
- [2] 牛玉芬. SAR/InSAR 技术用于矿区探测与形变监测研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- Niu Y F. SAR/InSAR technology used in mining area detection and deformation monitoring research[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [3] 朱建军, 杨泽发, 李志伟. InSAR 矿区地表三维形变监测与预计研究进展[J]. 测绘学报, 2019, 48(2): 135-144.
- Zhu J J, Yang Z F, Li Z W. Recent progress in retrieving and predicting mining-induced 3D displacements using InSAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(2): 135-144.
- [4] 朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR 形变监测方法与研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1717-1733.
- Zhu J J, Li Z W, Hu J. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1717-1733.
- [5] 张凯, 李全生, 戴华阳, 等. 矿区地表移动“空天地”一体化监测技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 207-213.
- Zhang K, Li Q S, Dai H Y, et al. Research on integrated monitoring technology and practice of “space-sky-ground” on surface movement in mining area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 207-213.
- [6] 孙赫, 陈巍然, 牛玉芬, 等. 基于 InSAR 的矿区沉降中心动态变化监测与分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(3): 276-280.
- Sun H, Chen W R, Niu Y F, et al. Monitoring and analysis of dynamic change of mining subsidence center based on InSAR[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(3): 276-280.
- [7] 刘志敏, 李永生, 张景发, 等. 基于 SBAS-InSAR 的长治矿区地表形变监测[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(3): 37-42. doi:10.6046/gtzyyg. 2014. 03. 06.
- Liu Z M, Li Y S, Zhang J F, et al. An analysis of surface deformation in the Changzhi mining area using small baseline InSAR[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(3): 37-42. doi:10.6046/gtzyyg. 2014. 03. 06.
- [8] Ge L, Chang H C, Janssen V, et al. Integration of GPS, Radar interferometry and GIS for ground deformation monitoring[J]. GPS Solutions, 2003, 7(1): 52-54.
- [9] 龙四春, 唐涛, 张赵龙, 等. DInSAR 集成 GPS 的矿山地表形变监测研究[J]. 测绘通报, 2014(11): 6-10.
- Long S C, Tang T, Zhang Z L, et al. On mining ground deformation monitoring based on integration of DInSAR and GPS[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(11): 6-10.
- [10] 蔡杰华, 张路, 董杰, 等. 九寨沟震后滑坡隐患雷达遥感早期识别与形变监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1707-1716.
- Cai J H, Zhang L, Dong J, et al. Detection and monitoring of post-earthquake landslides in Jiuzhaigou using Radar remote sensing[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(11): 1707-1716.
- [11] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic aperture Radar interferometry[J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(3): 333-382.
- [12] 李锁乐, 吴宏安, 张永红, 等. 包头市地面沉降高分辨率时序 InSAR 监测[J]. 测绘科学, 2018, 43(9): 80-84.
- Li S L, Wu H A, Zhang Y H, et al. Land subsidence monitoring in Baotou using high resolution time series InSAR technique from 2013 to 2015[J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(9): 80-84.
- [13] 廖明生, 王腾. 时间序列 InSAR 技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- Liao M S, Wang T. Time series InSAR technology and application[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [14] 白泽朝, 靳国旺, 张红敏, 等. 天津地区 Sentinel-1A 雷达影像 PSInSAR 地面沉降监测[J]. 测绘科学技术学报, 2017, 34(3): 283-288.
- Bai Z C, Jin G W, Zhang H M, et al. Subsidence monitoring of Tianjin using PSInSAR technique with Sentinel-1A[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2017, 34(3): 283-288.
- [15] 朱猛, 董少春, 尹宏伟, 等. 基于 SBAS-InSAR 方法的苏州地区 2007—2010 年地表形变时空变化研究[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(10): 1418-1427.
- Zhu M, Dong S C, Yin H W, et al. Spatial-temporal ground deformation study of Suzhou area from 2007 to 2010 based on the SBAS InSAR method[J]. Journal of Geo-Information Science, 2016, 18(10): 1418-1427.
- [16] Usai S. A least squares database approach for SAR interferometric data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(4): 753-760.
- [17] 沙永莲, 王晓文, 刘国祥, 等. 基于 SBAS-InSAR 的新疆哈密砂墩子煤田开采沉降监测与反演[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(3): 194-201. doi:10.6046/zrzyyg. 2020026.
- Sha Y L, Wang X W, Liu G X, et al. SBAS-InSAR-based monitoring and inversion of surface subsidence of the Shadunzi coal mine in Hami City, Xinjiang[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(3): 194-201. doi:10.6046/zrzyyg. 2020026.
- [18] 李达, 邓喀中, 高晓雄, 等. 基于 SBAS-InSAR 的矿区地表沉降监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(10): 1531-1537.
- Li D, Deng K Z, Gao X X, et al. Monitoring and analysis of surface subsidence in mining area based on SBAS-InSAR[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(10): 1531-1537.
- [19] 李振洪, 宋闯, 余琛, 等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用: 挑战与对策[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 967-979.
- Li Z H, Song C, Yu C, et al. Application of satellite Radar remote sensing to landslide detection and monitoring: Challenges and solutions[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 967-979.
- [20] Usai S, Klees R. SAR interferometry on a very long time scale: A study of the interferometric characteristics of man-made features[J]. Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on, 1999, 37(4): 2118-2123.
- [21] 马秀秀, 王雅萍, 程结海, 等. 临汾市近 20 年植被覆盖度遥感估算及动态变化分析[J]. 能源与环境, 2019, 41(11): 11-18.

Ma X X, Wang Y P, Cheng J H, et al. Remote sensing estimation and dynamic change analysis of vegetation coverage in Linfen City in recent 20 years [J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2019, 41 (11): 11 - 18.

山西师范大学学报(自然科学版), 2016, 30(2): 117 - 123.  
Zhao Z B, Han J Q, Chen S. Analysis of geological disasters and its harmfulness in Linfen [J]. *Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 30(2): 117 - 123.

[22] 赵振斌, 韩军青, 陈 硕. 临汾市地质灾害及其危害性分析[J].

## InSAR – based large – scale detection and monitoring of the surface deformation in Linfen mining areas, Shanxi Province

MA Xuefei<sup>1,2</sup>, ZHANG Shuangcheng<sup>1,2</sup>, HUI Wenhua<sup>1</sup>, XU Qiang<sup>1</sup>

(1. *College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China*; 2. *State Key Laboratory of Geo – Information Engineering, Xi'an 710054, China*)

**Abstract:** The ground subsidence caused by continuous mining in mining areas will seriously destroy the environment. There is an urgent need to quickly identify the locations and surface deformation of large – scope mining areas in the mining area monitoring. Given this, this study carried out large – scale detection and monitoring of the subsidence of mining areas in Linfen City using the synthetic aperture Radar interferometry (InSAR) technique. Firstly, by processing and analyzing 12 scenes of Sentinel 1A ascending data using the differential interferometric synthetic aperture Radar (D – InSAR) technique, this study conducted large – scale detection of subsidence disasters in mining areas in the study area. Then, this study processed 432 scenes of Sentinel 1A ascending data from different orbits using the small baseline subset InSAR (SBAS – InSAR) and monitored the obtained key areas. The results of this study show that there are a total of 105 subsidence areas in Linfen City, all of which are located in the mountains on both sides of the faulted Linfen basin. Further time – series deformation monitoring of key subsidence areas shows that many subsidence areas are continuously deforming, with high deformation amplitude and the deformation rate up to a maximum of  $-381$  mm/a, and have caused huge damage to the ecological environment and infrastructure on the surface. The mining points near the subsidence area were identified according to optical images, thus verifying the reliability of the large – scale detection and monitoring method based on the InSAR technology. The results of this study will provide an important basis for the prevention and control of subsidence disasters in the mining areas of Linfen.

**Keywords:** large – scale detection; D – InSAR; SBAS; deformation monitoring

(责任编辑: 李 瑜)