

doi: 10.6046/zrzyyg.2020137

引用格式: 李梦梦, 范雪婷, 陈超, 等. 徐州矿区 2016—2018 年地面沉降监测与分析[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(4): 43–54.  
(Li M M, Fan X T, Chen C, et al. Monitoring and interpretation of land subsidence in mining areas in Xuzhou City during 2016—2018 [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(4): 43–54.)

# 徐州矿区 2016—2018 年地面沉降监测与分析

李梦梦, 范雪婷, 陈超, 李倩楠, 杨锦

(江苏省基础地理信息中心, 南京 210013)

**摘要:** 时间序列合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture Radar, InSAR)技术因可以安全、高效地获取大范围、高精度地面沉降数据而被广泛应用。如何通过该技术准确、高效获取不同开采状态矿区的地面沉降数据,为矿区生态环境治理提供数据支撑依然是当前热点。文章基于 58 景 Sentinel-1A 影像数据,采用多主影像相干目标小基线 InSAR 方法(multiple master-image coherent target small-baseline interferometric SAR, MCTSB-InSAR),对徐州市 6 个矿区进行时序监测,得到矿区 2016—2018 年间地面沉降监测结果。用相近时段内的实测水准数据对年均沉降速率进行精度验证,二者差值的均方根误差为 4.0 mm/a,满足监测要求。监测结果表明:张双楼煤矿和三河尖煤矿沉降较为严重,最大年均沉降速率均超过 100 mm/a,最大累计沉降量均超过 300 mm;旗山煤矿、拾屯煤矿、权台煤矿和张集煤矿沉降较轻,监测时段内沉降均发生在矿区范围内,无明显扩张趋势。结合江苏省 2016 年地理国情监测数据分析,三河尖煤矿有 2 844 个高相干点落入房屋及道路内,占该矿区总高相干点数的 73.66%,张双楼煤矿有 672 个高相干点落入房屋及道路内,占该矿区总高相干点数的 63.33%;除权台煤矿外,其余矿区的时序沉降量与时间基本都呈线性关系,且在采矿区的沉降一般比停采矿区的线性规律更强,权台煤矿的时序沉降量符合非线性沉降规律。实验表明, Sentinel-1A 影像数据和 MCTSB-InSAR 技术在矿区地面沉降监测与分析方面具有良好的应用前景。

**关键词:** 矿区; 沉降监测; 时序分析; InSAR 技术

**中图法分类号:** P 237; P 258 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2021)04-0043-12

## 0 引言

随着科学的进步和经济的发展,地面沉降问题日益突出,已成为 21 世纪的主要地质灾害之一。地面沉降可破坏基础设施,改变土壤环境和水文环境,引起沉降附近社区居民恐慌,影响其未来居住规划等<sup>[1-2]</sup>。造成地面沉降的原因错综复杂,其中固体矿产的开采是影响地面沉降的原因之一<sup>[3-4]</sup>。被誉为“华东地区的煤炭海洋”的徐州,煤炭资源丰富,但在煤炭开采的同时也造成了地面沉降、地面塌陷等地质环境问题,严重制约了该地区的可持续发展<sup>[5-6]</sup>。传统的地面沉降监测主要以水准测量和全球卫星导航定位系统(global navigation satellite system, GNSS)测量为主,这些方法虽然单点精度高,但是外业周期长、连续性差、成本较高,且不能获得整个监测区域的整体沉降趋势<sup>[7]</sup>。

矿区本身的地质条件比较特殊,且现场测量安

全隐患大,水准作业难度较高,传统地面沉降监测方法对不定期发生的沉降和塌陷难以做到实时监测<sup>[8]</sup>,但时间序列合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture Radar, InSAR)技术可以安全高效地获取大范围、高精度地面沉降数据<sup>[9-10]</sup>,因此基于 InSAR 技术来监测矿区地面沉降是较佳选择。

Liu 等<sup>[5]</sup>基于 Sentinel-1 影像,监测徐州沛县部分矿区地面沉降状况,监测结果表明:ZSL 煤矿和 SHJ 煤矿沉降值与时间呈线性关系,并基于 Landsat8 影像的分类结果,研究沛县煤矿的沉降与土地利用分类的关系,发现农村地区比城市地区沉降严重,但影像的分类结果还需进一步提高,以便更精确地研究沉降与土地利用分类的关系;李达等<sup>[11]</sup>基于小基线集(small baseline subset, SBAS)技术对 13 景 TerraSAR-X 影像进行时间序列处理,并基于合成孔径雷达差分干涉测量(differential InSAR, D-InSAR)技术,验证 SBAS 技术得到的监测

收稿日期: 2020-05-09; 修订日期: 2020-11-23

基金项目: 江苏省测绘地理信息科研项目“江苏省 InSAR 地表沉降监测成果专题应用研究”(编号: JSCHKY201803)资助。

第一作者: 李梦梦(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向为 InSAR 数据处理与应用。Email: dream\_0705@sina.com。

结果,发现二者监测结果相近,但 SBAS 技术得到的监测结果更精确,由于缺乏研究区域的实测数据,监测结果的纵向正确性还有待验证; Chatterjee 等<sup>[12]</sup>基于 6 对多频 C 和 L 波段的 SAR 影像,通过 D-InSAR 技术研究矿区的地面沉降,监测结果表明,C 波段可以监测到缓慢或中度沉降的矿区,L 波段可以监测到快速沉降的矿区,但影像数量较少,基线长度相对较大; Grzovic 等<sup>[13]</sup>基于时间序列永久散射体干涉测量技术(permanent scatter interferometry, PSI)和 SBAS 技术处理 ERS-1/2 和 ALOS PALSAR 数据,得到 Springfield 地区煤矿开采区的地面沉降监测结果,由于 ALOS PALSAR 影像数量较少,其监测结果有失真现象; Bateson 等<sup>[14]</sup>基于间断相干小基线集(intermittent small baseline subset, ISBAS)技术处理 ERS-1/2 数据,提高了监测点密度,监测结果表明,矿区存在地面抬升现象,抬升速率达 1 cm/a,其原因可能是相较于开采期,停采期矿区水位恢复,但缺乏矿区开采数据,无法准确确定开采初期的矿井水位,其结果分析只能根据假定的开采数据来进行; Gupta 等<sup>[15]</sup>利用 InSAR 技术获取研究区域数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据来分析矿区地面高程值变化,高程精度偏差为 23.07 m,均方根误差为  $\pm 2.31$  m; 陆燕燕等<sup>[16]</sup>利用 ALOS PALSAR 影像对徐州张双楼煤矿进行地表形变监测,得到 2011-01-16—2011-03-03 的地表形变分布图,监测结果表明张双楼煤矿出现 3 处沉降漏斗,最大沉降量达 420 mm,且沉降漏斗与矿区分布一致,由于实验数据比较少,只能采用 D-InSAR 方法来监测矿区沉降变化,并未考虑时空去相关以及大气非均匀性影响,使得地表形变的监测精度受到限制。

基于 Sentinel-1A 数据,对在采矿区与停产矿区长时间序列沉降状况监测与对比分析的研究较少,结合地理国情监测数据研究高相干点分布的研究也比较少,本文利用 Sentinel-1A 影像数据基于多主影像相干目标小基线 InSAR 方法(multiple master-image coherent target small-baseline interferometric SAR, MCTSB-InSAR),结合江苏省 2016 年地理国情监测数据,开展徐州部分在采矿区与停产矿区 2016—2018 年的地面沉降监测研究与对比分析。

## 1 研究区概况与实验数据

### 1.1 研究区概况

徐州市地处苏鲁豫皖四省接壤地区,属温带季风气候,四季分明,夏无酷暑,冬无严寒,是资源丰富且组合条件优越的地区之一。其中煤炭储量约 69 亿 t,是江苏省唯一的煤炭产地,也是江苏省重要的能源基地。本文根据矿区停采时间,共选择 6 个矿区作为研究对象,矿区基本信息见表 1,影像、水准点和矿区分布见图 1,图中白色框为矿区放大影像。

表 1 矿区基本信息

Tab. 1 Basic information of mining area

煤矿名称	投产时间	停采时间	生产能力/(万 t·a <sup>-1</sup> )
权台煤矿	1959 年 12 月	2015 年 12 月	110
旗山煤矿	1959 年	2016 年 1 月	150
张集煤矿	1979 年 6 月	2016 年 5 月	85
拾屯煤矿	1992 年 1 月	2016 年 12 月	15
三河尖煤矿	1988 年 8 月	2019 年	120
张双楼煤矿	1986 年	—	120

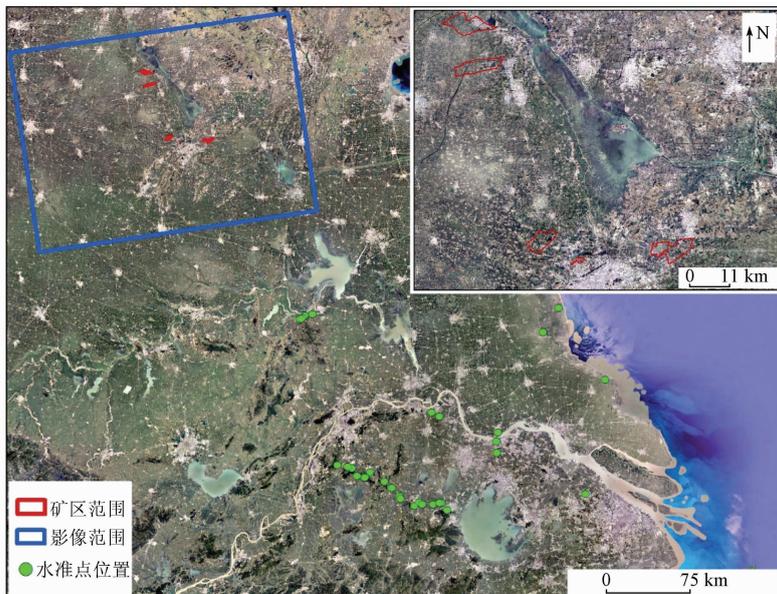


图 1 影像、水准点和矿区分布

Fig. 1 Images, bench mark and mining map

## 1.2 实验数据

本文采用的实验数据是 Sentinel-1A 雷达卫星影像。Sentinel-1 是由欧洲委员会和欧洲航天局针对哥白尼全球对地观测项目研制的一个载有 C 波段合成孔径雷达的双星星座。Sentinel-1 的 A 星于 2014 年 4 月 3 日发射成功, B 星于 2016 年 4 月 25 日发射成功, 单星重访周期为 12 d, 两星同时工作其重访周期为 6 d。Sentinel-1A 卫星有 4 种工作模式: 条带模式 (strip map, SM)、干涉宽幅模式 (interferometric wide swath, IW)、波模式 (wave, WV) 和超宽幅模式 (extra wide swath, EW), 本文使用 IW 模式的数据。IW 模式幅宽为 250 km, 空间分辨率为  $5 \times 20$  m, 采用了 TOPS (terrain observation with progressive scans SAR) 成像技术。TOPS 技术不仅能在保证空间分辨率的情况下增大地面覆盖范围, 还解决了 ScanSAR 的图像不均匀问题, 但是该成像模式使影像在方位向的多个脉冲序列 (burst) 之间易产生多普勒中心不一致问题<sup>[17]</sup>, 引入的干涉相位偏差可表示为:

$$\Delta\varphi = 2\pi f_{\eta c} \Delta\eta, \quad (1)$$

式中:  $\Delta\varphi$  为干涉相位偏差;  $f_{\eta c}$  为 burst 多普勒中心频率变化值;  $\Delta\eta$  为方位向主辅影像配准偏移量。干涉测量通常要求干涉相位偏差  $\Delta\varphi$  不超过  $3^\circ$ <sup>[18]</sup>, 则影像配准精度需达到 0.001 个像素<sup>[18-19]</sup>。

本研究共使用 58 景研究区范围内的 Sentinel-1A 升轨数据, 影像获取时间跨度为 2015 年 11 月—2018 年 12 月。

## 2 数据处理

基于 GDEM5.0 软件采用 MCTSB-InSAR 技术实现对徐州矿区的时间序列监测。MCTSB-InSAR 融合了永久散射体 InSAR 技术 (permanent scatterer InSAR, PS-InSAR)、SBAS 和相干目标等方法的优势, 针对 Sentinel-1A 数据的 TOPS 成像模式特性, 数据处理主要包括: 数据预处理、线性形变反演和非线性形变反演 3 个部分。

### 2.1 数据预处理

SAR 数据预处理主要是 SAR 影像差分干涉处理的过程。针对 Sentinel-1A 影像特点, 预处理主

要包括轨道加密、精确配准、干涉相对选择、生成差分干涉图等, 技术路线如图 2 所示。

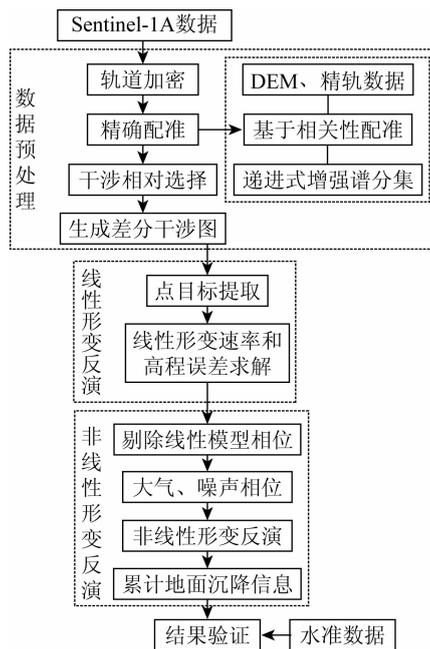


图 2 技术路线图

Fig. 2 Technique flow chart

增强谱分集配准方法虽然可以达到很高的配准精度, 但是有 2 点缺陷: ①若初始影像之间的配准精度低于 0.05 个像元, 则该方法容易出现迭代死循环的现象, 无法满足配准要求; ②若 2 幅影像时间基线较长, 容易造成时间失相干。又因为基于精密轨道和 DEM 数据的配准不受影像相干性影响, 可与基于相关性配准互补, 使粗配准精度达 0.05 个像元。因此本文采用基于精密轨道数据和 DEM 数据、相关性配准和递进式增强谱分集的多级配准方法。其中递进式增强谱分集就是选择与其相近的, 能够与第一主影像配准的影像作为第二主影像, 配准后再与第一主影像配准, 避免时间失相干<sup>[20]</sup>。

生成差分干涉图分 3 步, 首先基于典型小区域 (一般大小为 500 像素  $\times$  500 像素) 快速生成全部 (两两组合) 小干涉图; 然后根据小干涉图质量确定初选干涉像对; 最后根据初选像对生成大区域干涉图并进行筛选。针对整景影像, 先快速生成 1 653 个小区域差分干涉图, 然后对所有小干涉图的相干性进行定量评估, 按平均相干系数由高到低, 筛选出影像数 3 ~ 5 倍的干涉相对, 最终保留 315 幅差分干涉图, 基线对组合如图 3 所示。

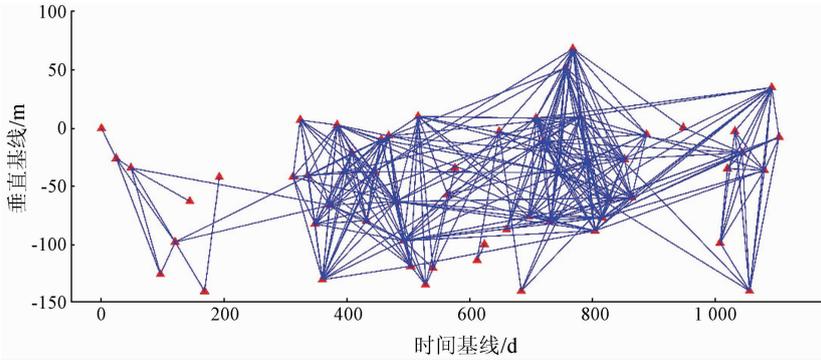


图3 小基线对基线时空分布

Fig. 3 Spatial and temporal distribution of small baseline pair

## 2.2 线性形变反演

线性形变反演主要包括：点目标提取、线性形变速率和高程误差求解等处理。

本文使用幅度离差、平均幅度、平均相干系数“三阈值”法来提取高相干点目标，分别设为 0.35, 1.1, 0.54, 本实验整景影像共提取高相干点目标

$$\Delta\varphi_{\text{diff}} = \left( \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{R\sin\theta} \Delta h + \frac{4\pi}{\lambda} T \Delta v \right) + \Delta R_{\text{non-linear}} + \Delta\varphi_{\text{APS}} + \Delta\varphi_{\text{noise}}, \quad (2)$$

$$\Delta\omega = \Delta R_{\text{non-linear}} + \Delta\varphi_{\text{APS}} + \Delta\varphi_{\text{noise}}, \quad (3)$$

式中： $B_{\perp}$  和  $T$  分别为干涉像对的空间基线和时间基线； $\lambda$  为波长； $R$  为传感器到目标的距离； $\theta$  为雷达入射角； $\Delta v$  为线性形变速率； $\Delta h$  为高程误差； $\Delta R_{\text{non-linear}}$  为非线性形变相位； $\Delta\varphi_{\text{APS}}$  为大气延迟相位； $\Delta\varphi_{\text{noise}}$  为噪声相位； $\Delta\omega$  为残余相位。通常  $|\Delta\omega| < \pi$ ，可通过整体相干性模型来估算  $\Delta v$  和  $\Delta h$ ，即

$$\max[|\gamma| = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \exp(j\Delta\omega)] , \quad (4)$$

式中： $\gamma$  为相干因子值； $M$  为干涉图数量； $i$  为第  $i$  幅干涉图； $j$  表示单位复数。利用二维周期图<sup>[21]</sup>或者空间搜索<sup>[22-23]</sup>等优化方法，通过模型解算出  $\Delta h$  和  $\Delta v$ 。

通常选择  $|\gamma| \geq 0.7$  的边作为可靠的连接，剔除不连接的高相干点目标。最后从某一参考点开始对连接边上解算出的速率和高程误差增量进行积分，将得到各相干点上形变速率和高程误差的绝对量<sup>[24]</sup>。

## 2.3 非线性形变反演

从差分干涉相位中去掉线性形变相位和高程误差相位，得到残余相位，包括大气相位、非线性形变相位和噪声相位。根据残余相位 3 个分量的不同时空频谱特征，利用时间和空间滤波的方法将三者分离出来<sup>[21]</sup>。最后叠加线性形变信息和非线性形变信息得到累计地面沉降量。

3 046 739 个。

对高相干点目标进行三角网连接，三角网边上两顶点之间的二次差分相位差包括线性形变、非线性形变、高程误差、大气影响、噪声 5 个部分贡献，具体公式为：

垂直方向的沉降结果可根据雷达视线方向沉降结果得到，公式为：

$$\Delta h_{\perp} = \frac{\Delta r}{\cos\theta}, \quad (5)$$

式中： $\Delta h_{\perp}$  为垂直方向沉降结果； $\Delta r$  为雷达方向沉降结果。基于 GDEM5.0 软件可直接得到垂直方向的形变结果。

## 3 精度评定

为验证 MCTSB-InSAR 方法得到的监测结果，收集江苏省“十二五”和“十三五”2 套水准数据，比较实测水准点得到的年均沉降速率与邻近 InSAR 点目标监测值的差异来评估 InSAR 沉降监测的精度。本文数据处理基于江苏省域数据处理，监测结果由覆盖江苏全省的多个 Frame 数据拼接得到，数据验证基于最后的全省拼接结果进行。根据 80 m 邻近原则，全省共筛选出 35 个实测水准点用来对监测结果进行精度评定，即：2 期水准数据的高程差值比上日期间隔，得到基于水准数据的点位沉降速率，然后与该水准点 80 m 范围内最近的 InSAR 点目标的沉降速率对比分析，如图 4 所示，年均沉降速率二者差值最大为 8.2 mm/a，最小为 0.1 mm/a，均方根误差为 4.0 mm/a，差值绝对值小于 1 mm/a 的水准点占比为 40%，满足规范<sup>[25]</sup>的要求，保证监测结果的可靠性。

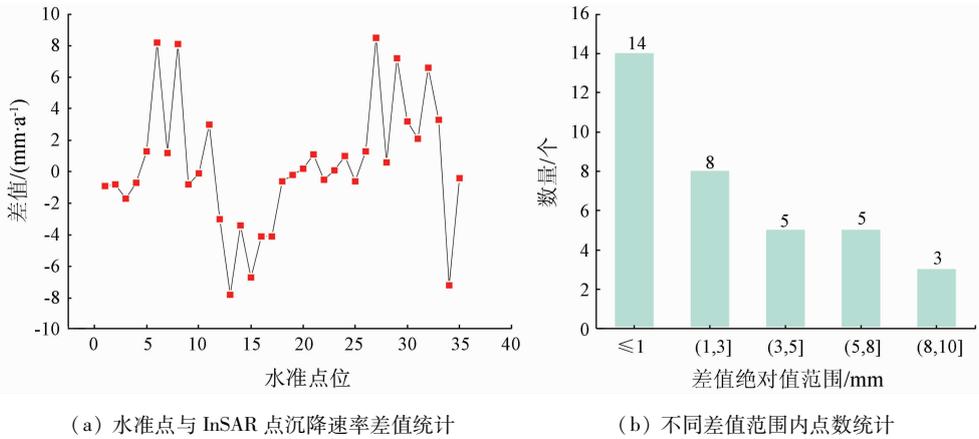


图 4 水准点与 InSAR 点沉降速率差值及不同差值范围内点数统计

Fig. 4 Statistics of subsidence rate difference between level point and InSAR point, and point for different difference ranges

### 4 结果与分析

#### 4.1 矿区地面沉降速率与累计沉降量分析

监测结果显示 6 个矿区都有沉降发生,各个矿区的最大沉降速率和最大累计沉降量如图 5 所示,各个矿区的地面沉降速率和累计地面沉降量

空间分布如图 6 所示。其中权台煤矿、张集煤矿和拾屯煤矿的最大沉降速率均介于 20 ~ 30 mm/a 之间,旗山煤矿略大于 30 mm/a,三河尖煤矿和张双楼煤矿均大于 100 mm/a。权台煤矿、张集煤矿和拾屯煤矿的最大累计沉降量均不超过 100 mm;旗山煤矿略大于 100 mm,三河尖煤矿和张双楼煤矿均大于 300 mm。

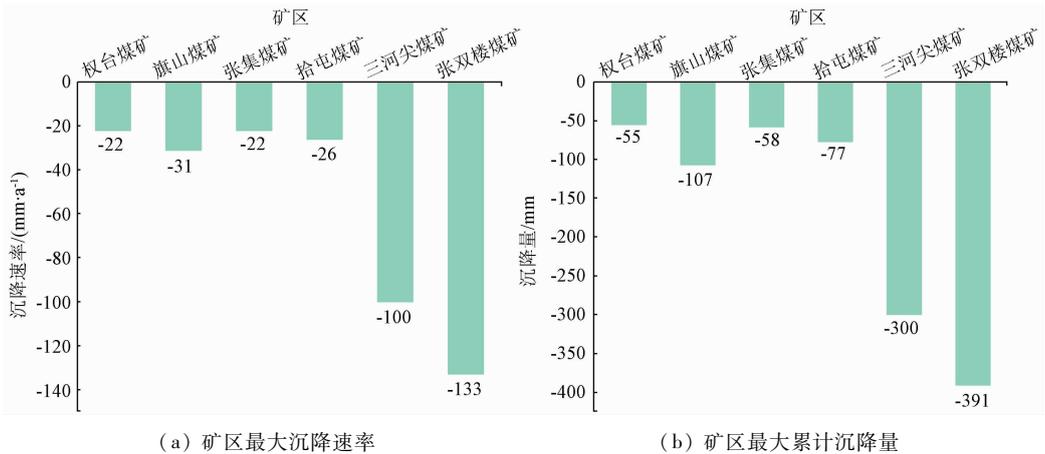


图 5 矿区最大沉降速率及最大累计沉降量

Fig. 5 Maximum subsidence rate and value of mining area

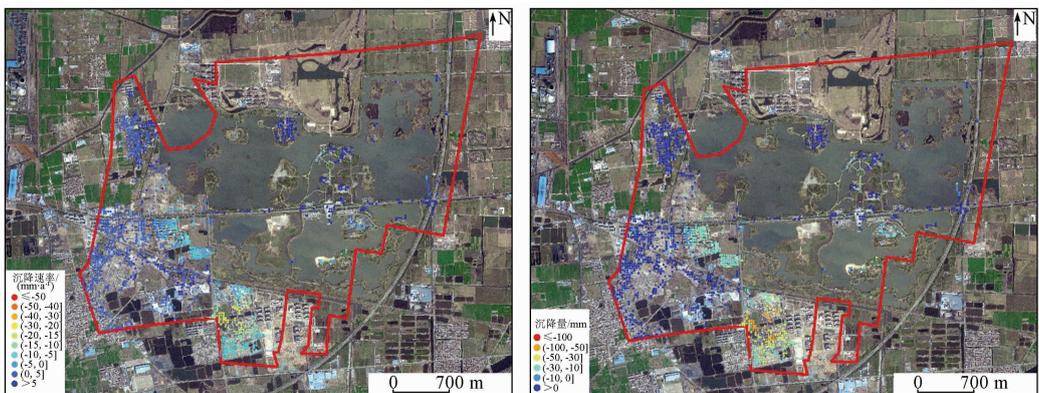
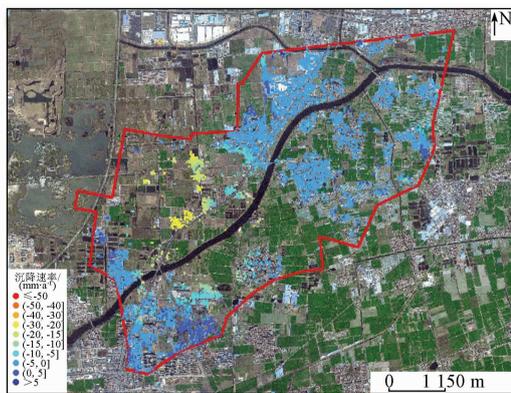
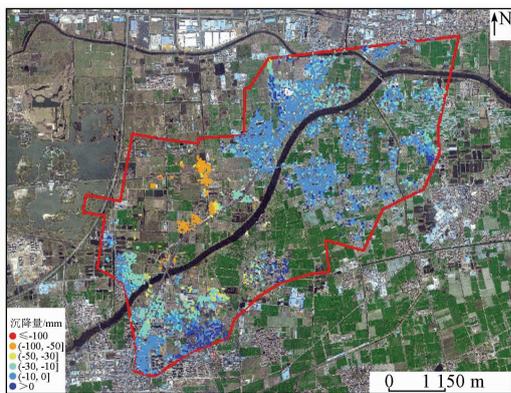


图 6-1 矿区地面沉降速率和累计地面沉降量空间分布

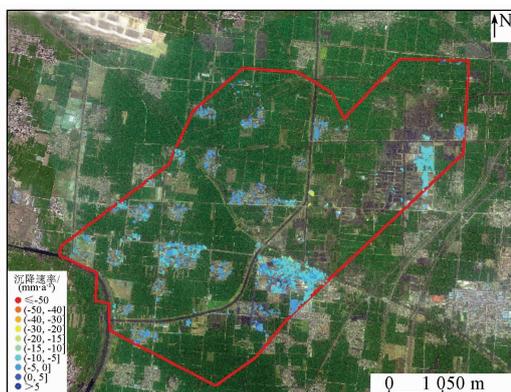
Fig. 6-1 Spatial distribution of land subsidence rate and accumulated land subsidence in mining area



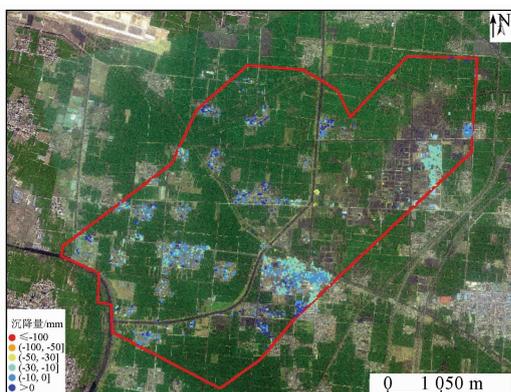
(c) 旗山煤矿地面沉降速率



(d) 旗山煤矿累计地面沉降量



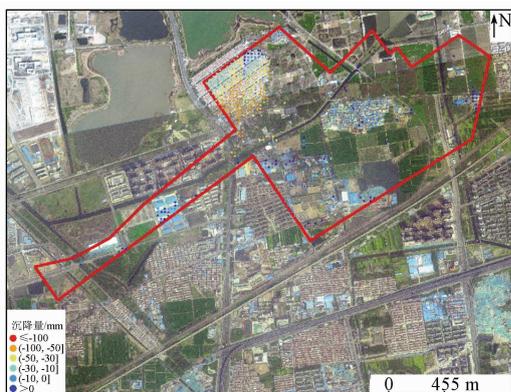
(e) 张集煤矿地面沉降速率



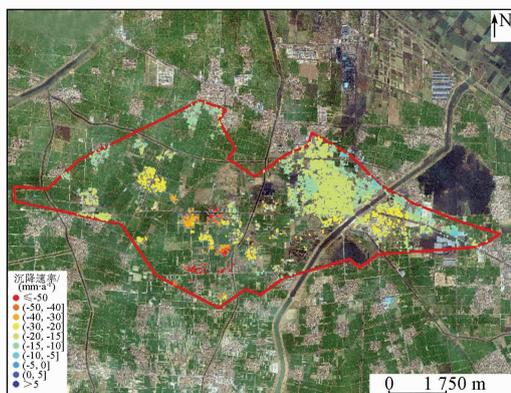
(f) 张集煤矿累计地面沉降量



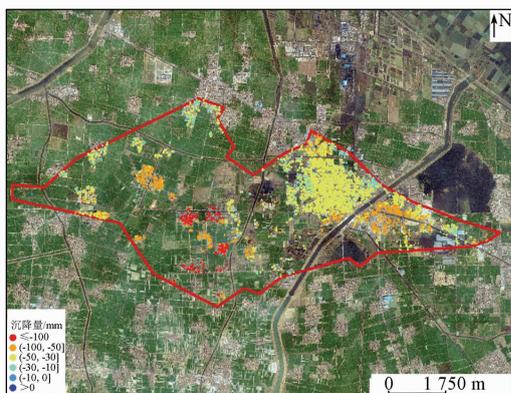
(g) 拾屯煤矿地面沉降速率



(h) 拾屯煤矿累计地面沉降量



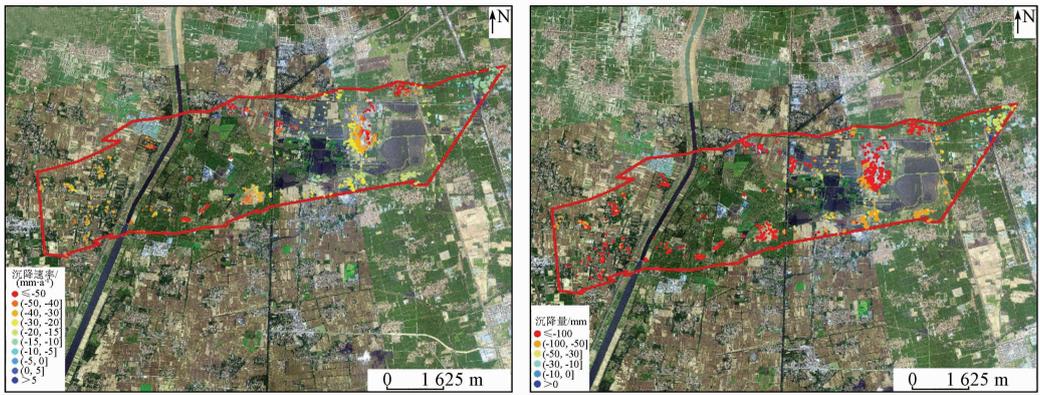
(i) 三河尖煤矿地面沉降速率



(j) 三河尖煤矿累计地面沉降量

图 6-2 矿区地面沉降速率和累计地面沉降量空间分布

Fig. 6-2 Spatial distribution of land subsidence rate and accumulated land subsidence in mining area



(k) 张双楼煤矿地面沉降速率

(l) 张双楼煤矿累计地面沉降量

图6-3 矿区地面沉降速率和累计地面沉降量空间分布

Fig. 6-3 Spatial distribution of land subsidence rate and accumulated land subsidence in mining area

统计各个矿区内的各相干点,如图7所示,结果表明:权台煤矿沉降速率大于0 mm/a的点数占比为68.47%。张集煤矿、拾屯煤矿和旗山煤矿沉降速率介于0~10 mm/a的点数占比最大,分别为:93.90%,69.48%和79.50%。三河尖煤矿沉降速率介于10~30 mm/a的点数占比为92.18%,张双楼煤矿沉降速率介于30~50 mm/a的点数占比为40.15%,介于10~30 mm/a的点数占比为39.68%。结合江苏省2016年地理国情监测数据,把地类分为房屋及道路、水体、植被和裸露地表4类,如图8所示,由于地理国情数据的原因,三河尖煤矿覆盖区域不完全。从图8中可看出,三河尖煤矿内房屋及道路面积明显大于张双楼煤矿,三河尖煤矿有2844个高相干点落入房屋及道路内,占该矿区总高相干点数的73.66%,张双楼煤矿有672个高相干点落入房屋及道路内,占该矿区总高相干点数的63.33%。由此也

说明,高相干点目标提取较为可靠。

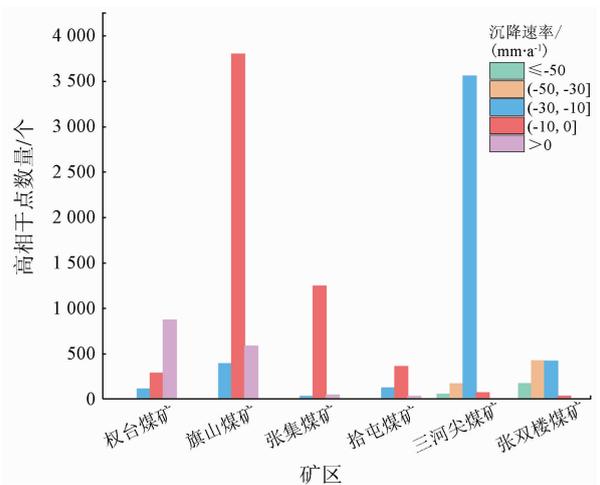
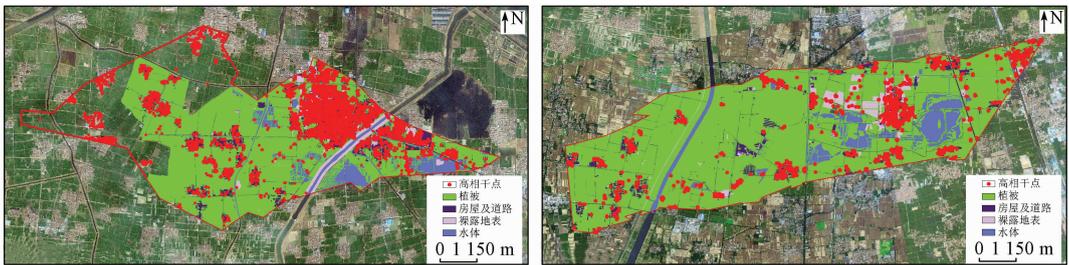


图7 矿区内不同沉降速率范围高相干点个数统计

Fig. 7 Statistic of high-coherence points in different subsidence rate ranges in the mining area



(a) 三河尖煤矿

(b) 张双楼煤矿

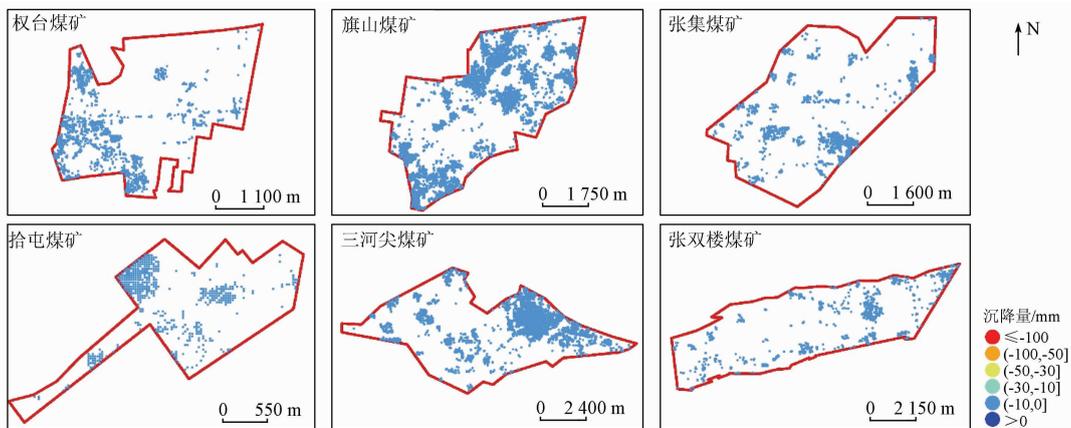
图8 矿区土地利用分类及高相干点分布

Fig. 8 Land use classification and high-coherence distribution map of mining area

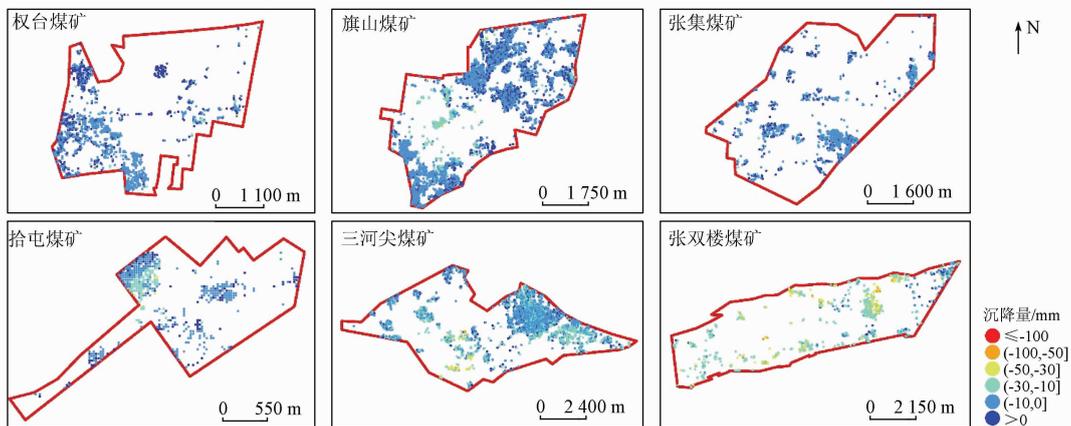
#### 4.2 矿区地表时序沉降空间分析

以2015年11月27日为起始时间,其他时间相对起始时间的研究矿区时序累计沉降量空间分布如图9所示。从图9中可以看出,从起始时间到2016年6月期间,张双楼煤矿、三河尖煤矿、旗山煤矿、拾屯煤矿有10 mm以上的沉降量,张集煤矿、权台煤矿没有发生明显沉降现象,直到2017年6月,权台煤矿开始出现明显沉降现象,张集煤

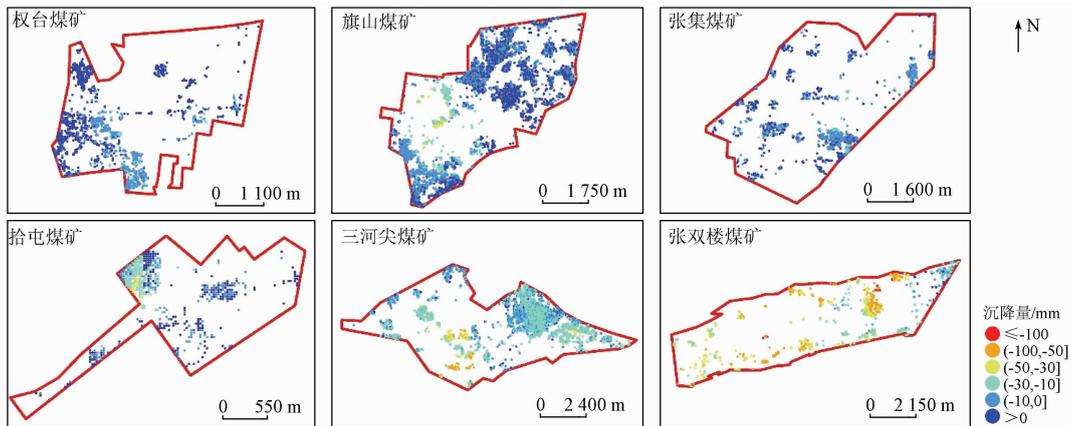
矿稍有沉降现象。随着时间推移,张双楼煤矿和三河尖煤矿的沉降范围迅速扩大,沉降逐渐加深,对周边影响也比较严重。其余煤矿的沉降均发生在矿区范围内,且沉降范围较稳定,没有明显扩张趋势,对其周边地区影响较小。总体来说,矿区在停采一段时间后沉降仍然会继续发生,不同停采矿区的沉降情况不同,但是停采矿区的沉降情况比在采矿区要轻微得多。



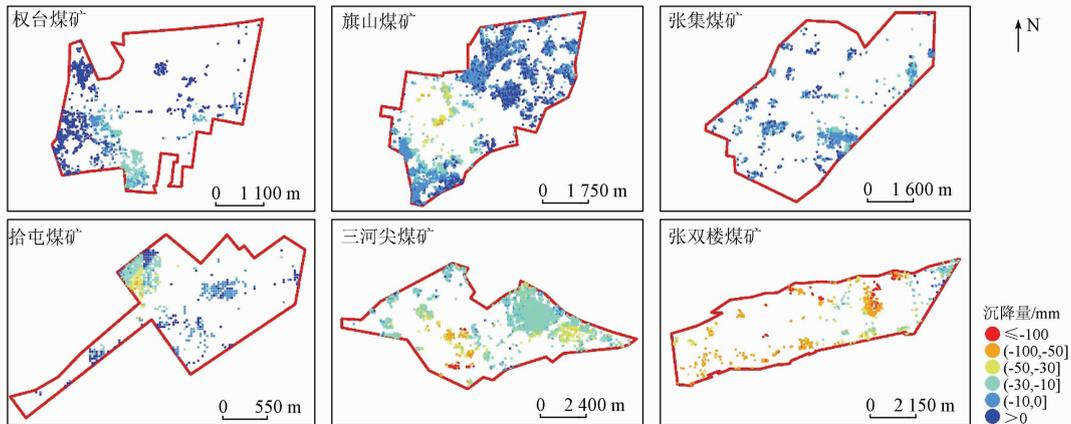
(a) 2015年11月27日



(b) 2016年6月6日



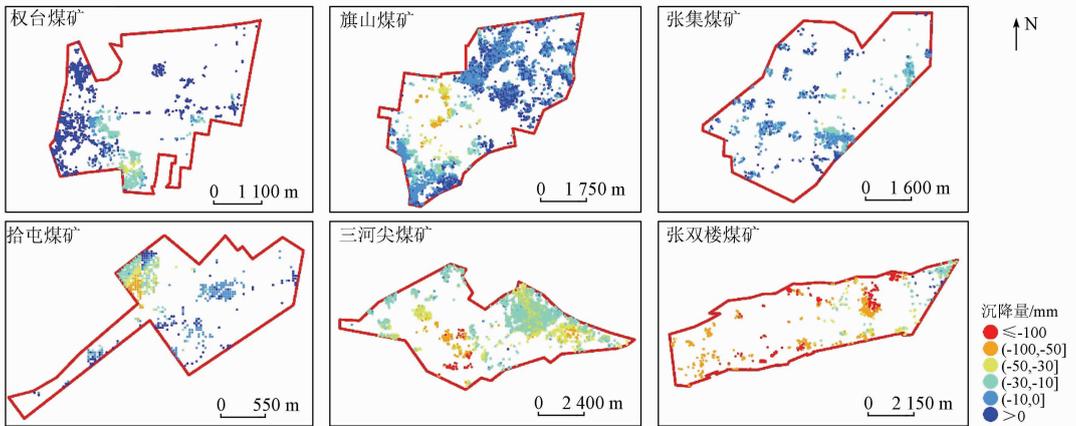
(c) 2016年12月27日



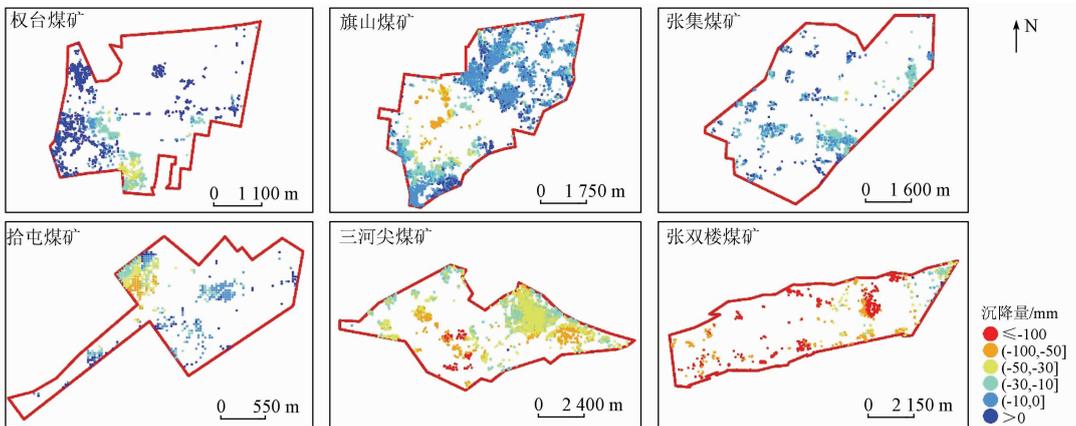
(d) 2017年6月25日

图9-1 矿区累计沉降量时序变化

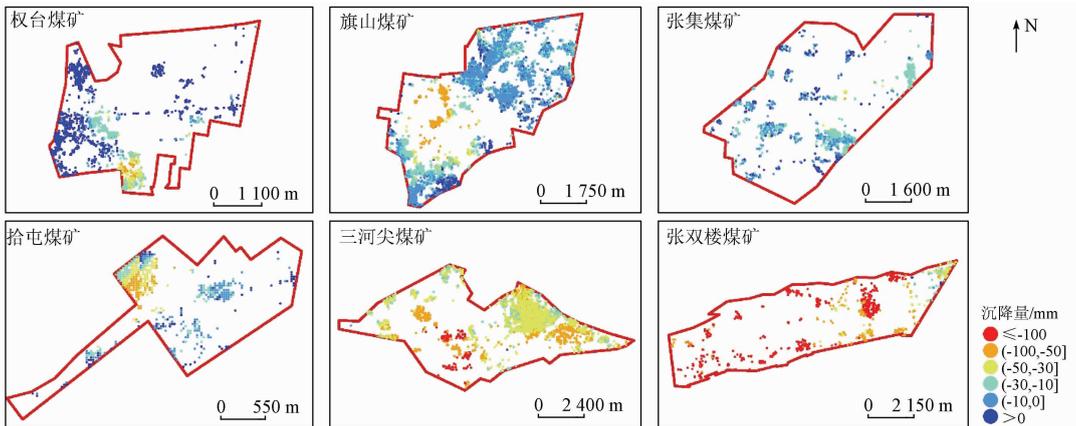
Fig. 9-1 Time-series variation diagram of accumulated subsidence in mining area



(e) 2017 年 12 月 22 日



(f) 2018 年 7 月 2 日



(g) 2018 年 12 月 5 日

图 9-2 矿区累计沉降量时序变化

Fig. 9-2 Time-series variation diagram of accumulated subsidence in mining area

### 4.3 矿区地表沉降时间特征分析

为分析研究区域的沉降时间特征,提取各矿区最大沉降点的时序沉降值,利用简单的线性拟合模型,得到沉降值和时间的关系,如图 10 所示。从图 10 中可以看出,矿区的沉降量与时间基本都呈线性关系, $R^2$ 均大于 0.9。线性拟合斜率绝对值从大到小为:张双楼煤矿(0.365)、三河尖煤矿(0.277)、旗山煤矿(0.097)、拾屯煤矿(0.065)、权台煤矿(0.057)、张集煤矿(0.056),张双楼煤矿和三河尖

煤矿的线性规律比其他煤矿要强,权台煤矿的线性规律较弱。对权台煤矿的时序沉降量做简单的非线性拟合,发现其沉降规律更符合非线性变化,在监测末期,沉降接近平稳状态。虽然旗山煤矿的停采时间与权台煤矿较一致,但旗山煤矿的时序沉降量没有表现出明显的非线性变化,由于影响矿区沉降的因素多种多样,停采矿区的沉降规律还有待进一步研究。

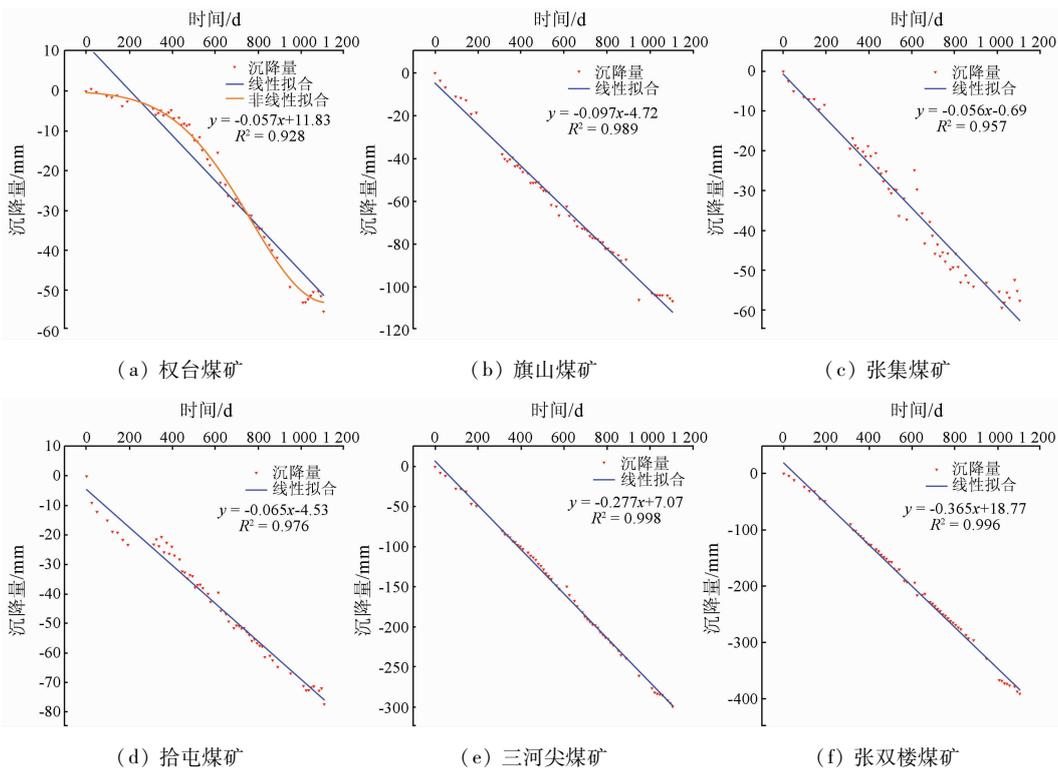


图 10 矿区累计沉降量变化统计

Fig. 10 Statistical chart of accumulative subsidence in mining area

### 5 结论

本文基于 Sentinel - 1A 雷达影像数据利用 MCTSB - InSAR 方法监测徐州部分矿区 2016—2018 年间地面沉降状况,经实测水准数据验证,二者差值的均方根误差为 4.0 mm/a,符合技术规范要求,监测结果较准确、可靠。

监测结果表明,2016—2018 年间张双楼煤矿沉降最为严重,其次为三河尖煤矿,二者的最大年均沉降速率均超过 100 mm/a,最大累计沉降量均超过 300 mm。结合江苏省 2016 年的地理国情监测数据发现,本研究提取的高相干点目标较大部分对应房屋、道路等人工地物,揭示了人工地物具有高相干特性。通过分析沉降量的时序特征发现,除权台煤矿外,其他矿区的沉降有明显线性规律,在采矿区的线性规律比停采矿区的线性规律要强一些,权台煤矿呈非线性沉降,具体沉降规律还有待进一步研究。

研究结果表明,针对矿区特殊的地质条件,基于 Sentinel - 1A 数据和 MCTSB - InSAR 方法,在安全、高效监测矿区沉降方面有较好的应用前景,其监测结果可为生态环境治理、矿区沉降预测、安全隐患区监测等提供数据支撑和技术服务。

### 参考文献 (References) :

[1] Howladar M F. Environmental impacts of subsidence around the

Barapukuria coal mining area in Bangladesh[J]. Energy, Ecology and Environment,2016,1(6):370-385.

[2] Sahu P, Lokhande R D. An investigation of sinkhole subsidence and its preventive measures in underground coal mining[J]. Procedia Earth and Planetary Science,2015,11:63-75.

[3] Saeidi A, Deck O, Verdel T. Comparison of building damage assessment methods for risk analysis in mining subsidence regions [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2013, 31(4): 1073-1088.

[4] 岳建平, 方露. 城市地面沉降监控理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1-5.

Yue J P, Fang L. Theory and technology of urban land subsidence monitoring[M]. Beijing: Science Press, 2012: 1-5.

[5] Liu X, Wang Y, Yan S. Interferometric SAR time series analysis for ground subsidence of the abandoned mining area in north Peixian using Sentinel - 1A TOPS data[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2018, 46(3): 451-461.

[6] 何敏, 陆晓燕, 何秀凤. 利用 D - InSAR 二轨法监测徐州大屯中心区地表形变[J]. 地理空间信息, 2011, 9(5): 3-5.

He M, Lu X Y, He X F. Surface deformation in the central area of Xuzhou Datun was monitored by D - InSAR[J]. Geospatial Information, 2011, 9(5): 3-5.

[7] 郭炳跃, 何敏, 刘建东. 利用 InSAR 技术监测徐州市矿区地表变形[J]. 地质学刊, 2012, 36(1): 99-103.

Guo B Y, He M, Liu J D. Surface deformation monitoring with InSAR technology in Xuzhou[J]. Journal of Geology, 2012, 36(1): 99-103.

[8] 武继峰, 杨志强. InSAR 技术应用于矿区开采沉陷监测的数据优选研究[J]. 测绘通报, 2013(s1): 92-94.

Wu J F, Yang Z Q. The study of the data optimization of mining

- subsidence monitoring based on InSAR technique[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(s1):92-94.
- [9] Yang C, Zhang D, Zhao C, et al. Ground deformation revealed by Sentinel-1 MSBAS-InSAR time-series over Karamay oilfield, China[J]. Remote Sensing, 2019, 11(17):2027.
- [10] Chaussard E, Wdowinski S, Cabral-Cano E, et al. Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140:94-106.
- [11] 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.
- [12] Chatterjee R S, Thapa S, Singh K B, et al. Detecting, mapping and monitoring of land subsidence in Jharia Coalfield, Jharkhand, India by spaceborne differential interferometric SAR, GPS and precision levelling techniques[J]. Journal of Earth System Science, 2015, 124(6):1359-1376.
- [13] Grzovic M, Ghulam A. Evaluation of land subsidence from underground coal mining using time SAR (SBAS and PSI) in Springfield, Illinois, USA[J]. Natural Hazards, 2015, 79(3):1739-1751.
- [14] Bateson L, Cigna F, Boon D, et al. The application of the intermittent SBAS (ISBAS) InSAR method to the South Wales Coalfield, UK[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 34:249-257.
- [15] Gupta M, Mohanty K K, Kumar D, et al. Monitoring surface elevation changes in Jharia coalfield, India using synthetic aperture Radar interferometry[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(6):2875-2883.
- [16] 陆燕燕, 何敏, 何秀凤. 基于 DInSAR 的徐州张双楼煤矿地表形变监测研究[J]. 测绘工程, 2013, 22(6):61-64.
- Lu Y Y, He M, He X F. Ground subsidence monitoring of Zhangshuanglou coal mine in Xuzhou City based on DInSAR[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2013, 22(6):61-64.
- [17] Nannini M, Prats-Iraola P, Zan F D, et al. TOPS time series performance assessment with TerraSAR-X data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(8):3832-3848.
- [18] 吴文豪, 李陶, 龙四春, 等. 实时轨道条件下 Sentinel-1 卫星影像干涉配准[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(5):745-750.
- Wu W H, Li T, Long S C, et al. Coregistration of sentinel-1 TOPS data for interferometric processing using real-time orbit[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(5):745-750.
- [19] De Zan F, Prats-Iraola P, Scheiber R. Interferometry with TOPS: Coregistration and azimuth shifts[C]//Berlin: VDE Verlag GmbH, 2014:949-952.
- [20] 康琪. TOPS 模式数据 InSAR 形变监测配准方法[D]. 北京: 中国测绘科学研究院, 2019.
- Kang Q. Registration method of TOPS data for InSAR deformation monitoring[D]. Beijing: Chinese Academy of Surveying and Mapping, 2019.
- [21] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1):8-20.
- [22] Mora O, Mallorqui J J, Broquetas A. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(10):2243-2253.
- [23] 张永红, 吴宏安, 孙广通. 时间序列 InSAR 技术中的形变模型研究[J]. 测绘学报, 2012, 41(6):864-869.
- Zhang Y H, Wu H A, Sun G T. Deformation model of time series interferometric SAR techniques[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(6):864-869.
- [24] 张永红, 吴宏安, 康永辉. 京津冀地区 1992—2014 年三阶段地面沉降 InSAR 监测[J]. 测绘学报, 2016, 45(9):1050-1058.
- Zhang Y H, Wu H A, Kang Y H. Ground Subsidence over Beijing-Tianjin-Hebei region during three periods of 1992 to 2014 monitored by interferometric SAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(9):1050-1058.
- [25] 国家测绘地理信息局. CH/T 6006—2018 时间序列 InSAR 地表形变监测数据处理规范[S]. 北京: 测绘出版社, 2018.
- National Bureau of Surveying, Mapping and Geographic Information. CH/T 6006—2018 specification of time series InSAR data processing for ground deformation monitoring[S]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2018.

## Monitoring and interpretation of land subsidence in mining areas in Xuzhou City during 2016—2018

LI Mengmeng, FAN Xueting, CHEN Chao, LI Qiannan, YANG Jin  
(Provincial Geomatics Centre of Jiangsu, Nanjing 210013, China)

**Abstract:** The time-series interferometric synthetic aperture Radar (InSAR) technology has been widely used since it allows for the safe and efficient obtainment of large-scale high-precision ground subsidence data. It is still a hot topic to efficiently obtain accurate land subsidence data of mining areas at different mining states using this technology to provide data support for the ecological governance of the mining areas. Based on Sentinel-1A images (58 scenes per complete orbit), this paper conducts time series monitoring of six mining areas in Xuzhou

City using the multiple master – image coherent target small – baseline interferometric SAR (MCTSB – InSAR) technique and obtains land subsidence results during 2016—2018. Meanwhile, it verifies the accuracy of the obtained subsidence rate using the measured data in a similar period, yielding a difference in root mean square error of 4.0 mm/a. Therefore, the monitoring requirements can be satisfied. The monitoring results are as follows. The Zhangshuanglou and Sanhejian coal mines suffered serious land subsidence, with the maximum average annual subsidence rate exceeding 100 mm/a and the maximum cumulative subsidence exceeding 300 mm. In comparison, the Qishan, Shitun, Quantai, and Zhangji coal mines experienced light subsidence, which all occurred within the mining areas and did not show a notable expansion trend during the monitoring period. Based on these results and the monitoring data of the basic geographical state of Jiangsu Province in 2016, there were 2 844 and 672 high – coherence points falling in houses and roads, respectively for the Sanhejian and Zhangshuanglou coal mines, which accounted for 73.66% and 63.33% of the total high coherence points of the mines, respectively. For the mining areas except for the Quantai coal mine, there was a roughly linear relationship between the subsidence amount and time, which was stronger in the mines under mining than in the mines where mining had stopped. In contrast, the relationship between the subsidence amount in the Quantai coal mine and time presented a nonlinear law. The experiment results show that Sentinel – 1A images and the MCTSB – InSAR technique have good application prospects in the monitoring and analysis of land subsidence in mining areas.

**Keywords:** mining area; subsidence monitoring; time – series analysis; InSAR technique

(责任编辑: 陈 理)

## 下 期 要 目

- 张大明 基于超像素及其最小生成树上 Parzen 窗密度估计的多光谱遥感图像分割
- 姚金玺 基于 GEE 的诺木洪洪积扇植被时空变化特征、成因及趋势分析
- 刘 文 基于光学遥感技术的冰崩隐患遥感调查及链式结构研究——以藏东南地区为例
- 秦大辉 基于多源数据的新疆干旱特征及干旱模型研究
- 赵晓伟 基于无人机多光谱数据的玉米苗株估算
- 侯美亭 植被遥感时间序列数据重建方法简述及示例分析
- 贺 鹏 基于地形起伏度的冰湖溃决隐患研究——以希夏邦马峰东部为例
- 史飞飞 基于集成学习和多时相遥感影像的枸杞种植区分类
- 吴琳琳 基于遥感和多源数据的城市土地利用分类
- 张秦瑞 改进遥感生态指数的宜宾市三江汇合区生态环境评价
- 孙一鸣 国产低成本微小卫星影像的城市裸地识别应用
- 臧丽日 耦合分水岭与形态学的特殊纹理影像配准算法
- 宋 奇 基于 1990—2019 年 Landsat 影像的干旱区绿洲土地利用变化与模拟
- 王 茜 高光谱遥感异常信息在阿尔金索拉克地区铜金矿找矿工作中的应用
- 任超锋 顾及地理空间信息的无人机影像匹配像对提取方法
- 潘建平 结合相关系数和特征分析的植被区域自动变化检测研发
- 伯英杰 浮岛光伏电场对地表温度空间分布特征的影响