doi: 10.6046/zrzyyg.2021245
引用格式: 李柱,范洪冬,高彦涛,等. 基于 DS - InSAR 的乌达煤田火区长时序地表形变监测与分析[J]. 自然资源遥感,2022,34(3):138 - 145. (Li Z, Fan H D, Gao Y T, et al. DS - InSAR - based monitoring and analysis of a long time series of surface deformation in the fire area of the Wuda coal field[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(3):138 - 145.)

基于 DS - InSAR 的乌达煤田火区长时序地表形变监测与分析

李 柱[1], 范洪冬[1], 高彦涛[2], 许耀宗[1]
(1. 中国矿业大学矿山生态修复教育部工程研究中心,徐州 221116; 2. 河南省地质矿产勘查开发局测绘地理信息院,郑州 450006)

摘要: 煤火燃烧不仅浪费了大量煤炭资源,而且严重破坏了火区生态环境,而传统监测方法存在范围小、频率低、成本高、危险大等问题。为此,研究了一种基于分布式目标合成孔径雷达干涉测量(distributed scatterer interferometric synthetic aperture Radar, DS - InSAR)技术的煤田火区监测方法。该方法通过快速同质点识别算法(fast statistically homogeneous pixels selection, FaSHPS)选取同质点,然后利用特征值分解方法对这些同质点进行相位优化,并根据时间相干性获取最终的分布式目标,最后结合短基线集(small baseline subsets, SBAS) InSAR 处理步骤解算时序地表形变。以 2017 年 3 月—2019 年 4 月 63 景 Sentinel - 1A 影像为数据源,利用本文方法获取了乌达煤田时序地表沉降,并与临时相干点合成孔径雷达干涉测量(temporarily coherent point interferometric synthetic aperture Radar, TCP - InSAR)技术监测结果进行了可靠性验证,结果表明: 两者间的相关系数为 0.84,监测点位密度比 TCP - InSAR 提高 1.24 倍; 乌达煤田存在严重的地表形变现象,研究区域内最大形变速率为 - 215 mm/a; 煤火区在秋冬季节地表形变变化相对较快,且具有多个形变延伸方向及发育程度不同的沉降中心。

关键词: DS - InSAR; 形变监测; 煤火监测; 长时序; 乌达煤田火区
中图法分类号: TP 79 **文献标志码**: A **文章编号**: 2097 - 034X(2022)03 - 0138 - 08

0 引言

煤火一般是指地下煤层火灾、近地表煤层火灾、煤矸石火灾和煤堆火灾[1]。大多数煤火是由于不适当的采矿造成的,也有一些是因处理不当的矿山废弃物、闪电和森林火灾引起的[2]。作为一种全球性灾害,煤火对人类健康、煤矿安全和基础设施造成了严重的负面影响。煤火的燃烧不仅消耗了大量宝贵的煤炭资源,同时引发地面沉降、裂缝、裂隙等地质灾害,释放的大量有毒气体(CO, NO_2, SO_2, H_2S)和微量元素(Hg, F, As, Se)还会造成严重的环境问题[3]。因此,全面、详细以及准确地监测煤火,对煤火的演变趋势、自燃规律和燃烧状态进行研究以及开展煤火治理活动具有重要的意义。

遥感方法具有获取信息速度快、监测区域面积大、周期短、全天时、全天候和经济效益高的特点,这些独特的优势可以弥补传统煤火探测与监测技术的不足[4]。利用遥感方法进行地面沉降监测和温度反演,已经成为煤火探测与监测领域的一个重要方向。国内外学者利用热红外遥感技术对乌达煤田煤火区进行了大量研究[5-8],可以较高精度地探测出煤火区及其演变趋势,但热红外遥感技术很难实现对深部煤火、煤火燃烧阶段以及煤火引起的地表形变的监测,这使得热红外遥感技术监测煤火时存在一定的不足。

差分合成孔径雷达干涉测量(differential interferometric synthetic aperture Radar, D - InSAR)技术作为一种先进的对地观测手段已在各种变形监测领域得到了广泛的应用,但是该技术易受时空失相关

收稿日期: 2021 - 08 - 12; **修订日期**: 2021 - 11 - 17
基金项目: 国家重点研发计划项目"矿区地表形变 InSAR 监测及地球物理模拟分析"(编号: 2017YFE0107100)、国家自然科学基金项目"关闭矿井地表沉陷机理、规律及预测方法研究"(编号: 51774270)、"大形变梯度条件下时序 TCP - InSAR 监测矿区动态沉陷关键问题研究"(编号: 41604005)和江苏省自然科学基金项目"顾及空间领域异质性的 SAR 影像自适应变化检测方法研究"(编号: BK20190645)共同资助。
第一作者: 李 柱(1998 -),男,硕士研究生,主要从事 InSAR 技术应用研究。Email: lizhu@cumt.edu.cn。
通信作者: 范洪冬(1981 -),男,博士,副教授,主要从事 InSAR 技术理论及应用研究。Email: cumtfanhd@163.com。

及大气延迟等因素影响,难以在长时序上得到高精度的地表形变结果[9],而近年来发展的分布式目标合成孔径雷达干涉测量(distributed scatterer interferometric synthetic aperture Radar,DS－InSAR)方法则有效地解决了长时序上低相干地区监测点位密度不足的问题[10]。目前,国内外一些学者利用合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture Radar,InSAR)技术对煤火区的探测与监测进行了相关研究,大多数研究侧重于将 InSAR 监测的地表形变结果作为辅助信息与地表热异常信息相结合进行煤火区域的探测[11－14],而对煤火引起的地表形变规律研究较少[15－16];另外,对于乌达煤田煤火的研究多数是利用热红外遥感技术进行探测与监测,只有少数研究采用 InSAR 技术[17－19],并且缺乏近些年的地表形变监测结果。

针对上述问题以及煤田火区的地表形变复杂、失相干严重等现象,本文研究了一种基于 DS－InSAR 技术的煤田火区监测方法,利用该方法对乌达煤田火区 2017 年 3 月—2019 年 4 月的 63 景 Sentinel－1A 影像进行了处理,通过监测结果对乌达煤田及其煤火区的地表形变进行了分析,验证了该方法的适用性。

1　研究区域概况及数据源

1.1　研究区域概况

乌达煤田位于中国内蒙古自治区西南部的乌海市乌达区,如图 1 所示。该区东邻黄河与鄂尔多斯

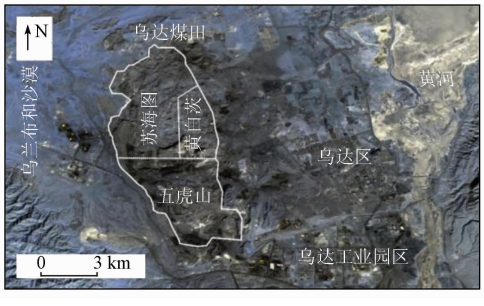


图 1　研究区域

Fig. 1　The study area

黄土高原,南部是乌达工业园区,西邻贺兰山脉北部边缘,北邻乌兰布和沙漠。煤田呈南北向斜状,面积约为 55 km^2,包括五虎山、黄白茨和苏海图 3 个煤矿,海拔从 1 100 ~ 1 300 m 不等,平均高程为 1 200 m。气候为典型的温带大陆性气候,年降水量为 168 mm,蒸发量为 3 500 mm 左右,常年干旱少雨。

1.2　数据源

Sentinel－1A 卫星由欧州航天局于 2014 年 4 月 3 日发射,采用近极地太阳同步轨道,轨道高度为 693 km,重访周期为 12 d,搭载了一个 C 波段的合成孔径雷达(synthetic aperture Radar,SAR),能提供超宽幅、干涉宽幅、条带以及波浪 4 种成像模式。本文选取 2017 年 3 月—2019 年 4 月期间的 63 景干涉宽幅模式成像下的 SAR 影像为数据源,其距离向和方位向的像元尺寸分别为 2.3 m 和 14.0 m。为去除干涉图中的地形相位,借助空间分辨率为 90 m 的 SRTM DEM 数据作为外部数字高程模型(digital elevation model,DEM)进行差分干涉处理。

2　DS－InSAR 方法原理

Ferretti 等[20]于 2011 年提出了第二代永久散射体技术 SqueeSAR。拉开了 DS－InSAR 方法研究的序幕。与传统的时序 InSAR 方法不同的是,DS－InSAR 方法在其基础上增加了同质点选取和相位优化 2 个步骤,有效地解决了传统时序方法相干点选取数目少和空间分布不均匀的问题。

2.1　同质点选取

本文利用快速同质点识别算法(fast statistically homogeneous pixels selection,FaSHPS)[21]进行同质点选取,该方法基于 SAR 影像集任一像元振幅的均值 $\bar{A}$ 服从高斯分布的假设,利用置信区间估计,通过简单的逻辑计算判断出同质点。

假设有 N 幅配准之后的 SAR 影像,对于任一像元 P,其时间维度上的振幅信息 $A(P) = [A_1, A_2, \cdots, A_N]$,振幅的均值 $\bar{A}(P)$ 服从高斯分布,可以用式(1)得到 $\bar{A}(P)$ 的区间估计,即

$$P\left\{E[A(P)] - Z_{1-\frac{\alpha}{2}}\sqrt{\frac{Var[A(P)]}{N}} < \bar{A}(P) < E[A(P)] + Z_{1-\frac{\alpha}{2}}\sqrt{\frac{Var[A(P)]}{N}}\right\} = 1-\alpha \quad , \tag{1}$$

式中:$P\{\cdot\}$ 为概率;$E[A(P)]$ 为 $A(P)$ 的期望;$Var[A(P)]$ 为 $A(P)$ 的方差;$Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ 为标准正态分布中置信度为 α 时的分位点。

在匀质区域的单视复数 SAR 影像服从瑞利分布,其变异系数 CV 为常数,即

$$CV = \frac{\sqrt{Var(\cdot)}}{E(\cdot)} = \sqrt{\frac{4}{\pi} - 1} \approx 0.52 \quad 。 \tag{2}$$

假设像元 P 后向散射性稳定,则式(1)可以转换为:

$$P\left\{E[A(P)] - 0.52\,Z_{1-\frac{\alpha}{2}}\frac{E[A(P)]}{\sqrt{N}} < \overline{A}(P) < E[A(P)] + 0.52\,Z_{1-\frac{\alpha}{2}}\frac{E[A(P)]}{\sqrt{N}}\right\} = 1-\alpha\text{。} \quad (3)$$

在确定置信区 α 后,通过判断待估计像元 P 在时间维度上的振幅平均值 $\overline{A}(P)$ 是否落入目标像元对应的区间,确定两者是否属于同质点。

2.2 特征值分解相位优化

利用相干矩阵分解法[22]进行相位优化。分布式目标中的像元在 SAR 影像具有相似的后向散射特性,则分布式目标的相干性矩阵可以表示为 $\widehat{\boldsymbol{T}}$,即

$$\widehat{\boldsymbol{T}} = E[\boldsymbol{y}\boldsymbol{y}^{\mathrm{H}}] = \frac{1}{N_{\mathrm{SHPs}}}\sum_{\boldsymbol{x}\in\Omega}\boldsymbol{y}\boldsymbol{y}^{\mathrm{H}}\ , \quad (4)$$

式中:向量 $\boldsymbol{y} = [y_1\ y_2,\cdots,y_N]$ 为分布式目标的同质点在 N 景 SAR 影像上的复数观测向量 $\boldsymbol{x} = [x_1,x_2,\cdots,x_N]$ 经过振幅归一化处理得到;N_{SHPs} 为分布式目标同质点的数目;H 为 Hermitian 共轭转置。

由于分布式目标的相干性矩阵 $\widehat{\boldsymbol{T}}$ 是 Hermitian 矩阵,根据半正定 Hermitian 矩阵可以进行特征值分解的性质可以将相干性矩阵 $\widehat{\boldsymbol{T}}$ 分解为:

$$\widehat{\boldsymbol{T}} = \widehat{\boldsymbol{T}}_{\mathrm{signal}} + \widehat{\boldsymbol{T}}_{\mathrm{noise}} = \lambda_1\boldsymbol{\mu}_1\boldsymbol{\mu}_1^{\mathrm{H}} + \sum_{i=2}^{N}\lambda_i\boldsymbol{\mu}_i\boldsymbol{\mu}_i^{\mathrm{H}}\ , \quad (5)$$

式中:λ_i 为特征值;$\boldsymbol{\mu}_i$ 为特征值对应的正交特征向量;$\widehat{\boldsymbol{T}}_{\mathrm{signal}}$ 为主导散射体信号;$\widehat{\boldsymbol{T}}_{\mathrm{noise}}$ 为噪声信号;特征值向量 $\boldsymbol{\mu}_1$ 为分布式目标优化后的相位。

DS – InSAR 数据处理具体流程如下:①根据设置的时空基线阈值选择干涉对,并生成干涉图;②利用 FaSHPS 方法对强度影像进行同质点识别,并通过特征值分解法对干涉图进行相位优化;③利用外部 DEM 去除干涉图中的地形相位生成差分干涉图,并利用优化后的相位计算同质点的时空相干性,设定相干性阈值选取分布式目标(distributed scatterer,DS)点;④利用差分干涉图对 DS 点上的相位进行解缠,并建立解缠相位与地表形变速率、DEM 误差和残余相位之间的观测方程;⑤利用奇异值分解法估算地表形变相位和 DEM 残余相位,并对残余相位进行时空滤波分离出非线性形变相位、大气相位和噪声相位;⑥将线性形变相位与非线性形变相位相加解算研究区域视线向(line of sight,LOS)的地表时序形变。数据处理流程如图 2 所示。

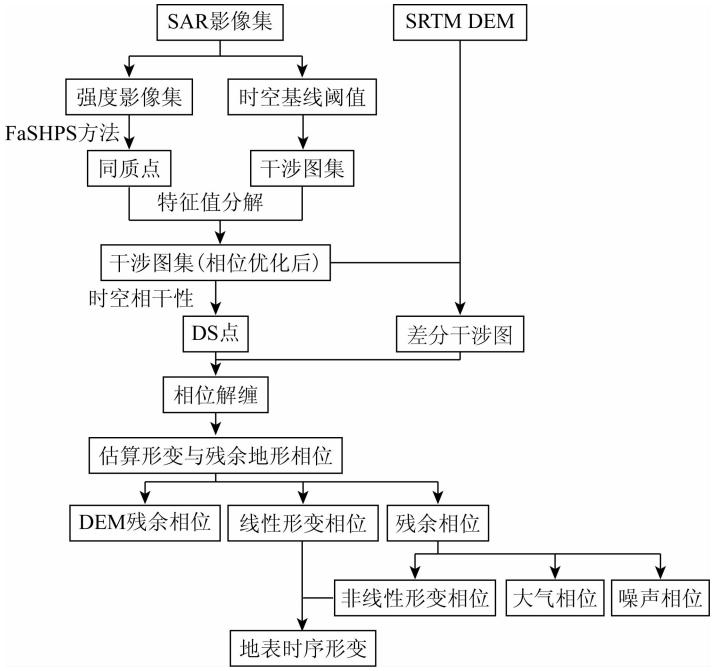


图 2 数据处理流程

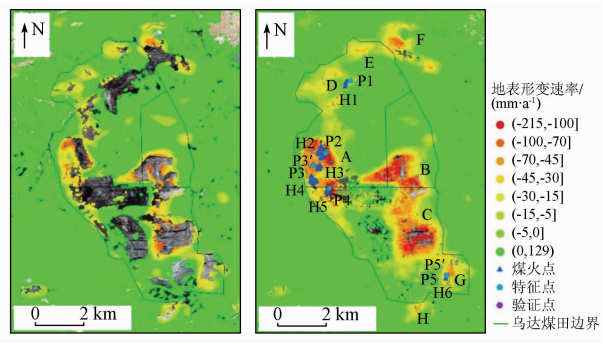
Fig. 2 Data processing flow chart

3 监测结果与分析

3.1 监测结果对比

分别采用 TCP – InSAR 与 DS – InSAR 方法对覆盖乌达煤田的 63 景 Sentinel – 1A 数据进行处理,获得了 2017 年 3 月—2019 年 4 月时间段内的地表时序形变信息,年平均形变速率如图 3 所示。从图 3 可以看出,二者虽在空间上形变趋势具有较好的一致性,但 DS – InSAR 监测结果能够更好地反映出

煤田的地表形变情况,并对研究区域形变明显的 8 个区域进行 A—H 编号。



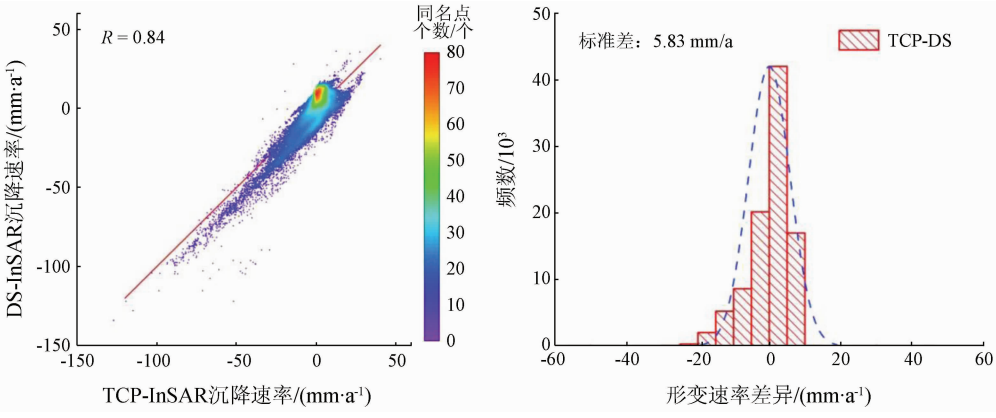
(a) TCP－InSAR　　(b) DS－InSAR

图 3　乌达煤田地表形变速率

Fig. 3　Surface deformation rate of Wuda coal field

TCP－InSAR 方法共选出了 156 853 个监测点;DS－InSAR 方法共选出了 194 585 个 DS 点。从选取的监测点数量而言,DS－InSAR 能够选出更多的 DS 点,监测点位密度比 TCP－InSAR 提高 1.24 倍,并且在低相干区域也可以获得足够数量的监测点;从监测点位的空间分布来看,DS－InSAR 方法选出的 DS 点在保证点密度的同时分布更均匀,在一定程度上提高了形变监测结果的解算精度,为研究区提供了更为详细准确的形变信息,有效地弥补了在低相干区域 TCP－InSAR 等传统时序形变监测方法中存在的缺陷。

为验证 DS－InSAR 监测结果的可靠性,通过对比分析 TCP－InSAR 和 DS－InSAR 获得的形变速率值来进行交叉验证。本文以 TCP 点为基准,选取最邻近的 DS 点作为同名点,共筛选出 95 760 对同名点,通过同名点对的形变速率值及其差异的统计分析,绘制了形变速率相关性和差异分布直方图,如图 4 所示。通过形变速率相关性(图 4(a))可知,DS－InSAR 与 TCP－InSAR 方法获得的地表形变速率之间具有较强的相关性,利用 Pearson 计算的相关系数 R 为 0.84。由形变速率差异分布直方图(图 4(b))可知,2 种方法获得的形变速率差异较小,两者之间的标准差为 5.83 mm/a。因此,在缺少实测水准数据的情况下,与 TCP－InSAR 方法监测结果的交叉验证,表明了 DS－InSAR 地表形变监测结果是较为可靠的。



(a) 形变速率相关性　　(b) 形变速率差异分布直方图

图 4　TCP－InSAR 和 DS－InSAR 同名点对形变速率相关性和差异分布直方图

Fig. 4　Correlation diagram and differential distribution histogram of deformation rate of the same point pairs of TCP－InSAR and DS－InSAR

3.2　乌达煤田地表形变分析

为了能够全面分析乌达煤田地表形变特点,本文利用 DS－InSAR 对乌达煤田进行了长时序的地表形变监测,时序形变累积如图 5 所示。图 5 中的 14 幅图是每隔一段时间相对于起始时间 2017 年 3 月 17 日的累积形变量。从图 5 中可以看出,在监测时间段内乌达煤田存在严重的地表形变现象。在空间上,沉降区域分布不均匀。在时间序列上,随着时间的推移研究区域内逐渐出现了形变量级与沉降范围大小不同的多个沉降区域。其中,A,B,C 这 3 个区域的形变现象最为严重,沉降范围最广,这 3 个区域的地表形变在整个监测时间段内持续存在,地表形变量与沉降范围越来越大,导致 B 和 C 区域从 2018 年 8 月 15 日之后逐渐连接形成一个大的沉降区域;G 区域的地表形变是从 2017 年 5 月 16 日开始产生,前期形变变化较小,到后期形变变化加快;D 和 F 区域从 2017 年 8 月 20 日之后地表开始产生形变,并逐渐形成多个沉降中心;H 区域的地表形变从 2017 年 12 月 18 日开始发生地表形变;E 区域产生地表形变的时间最晚,但地表形变变化较快,从 2018 年 10 月 14 日—2019 年 4 月 12 日半年的时间里产生了与 D 区域相同量级的形变。为更详细具

体地分析地表形变情况,利用图 3(b)地表形变速率图对其进行定量分析。从图 5 中可知,地表形变最为严重的 A,B,C 这 3 个区域的最大形变速率分别为 -178.4 mm/a, -166.3 mm/a 和 -215 mm/a,在这 3 个沉降区域的沉降中心,由于形变梯度大,地表形变量在监测时间段内超过时序 InSAR 的监测能力,失相干现象严重,无法得到足够密度的 DS 点;另外,F 和 G 这 2 个区域同样存在较为严重的形变,最大形变速率分别为 -96.5 mm/a 和 -100.9 mm/a;相比之下,D,E 和 H 区域的形变量相对较小,最大形变速率分别为 -46.5 mm/a, -53.9 mm/a 和 -48.5 mm/a。

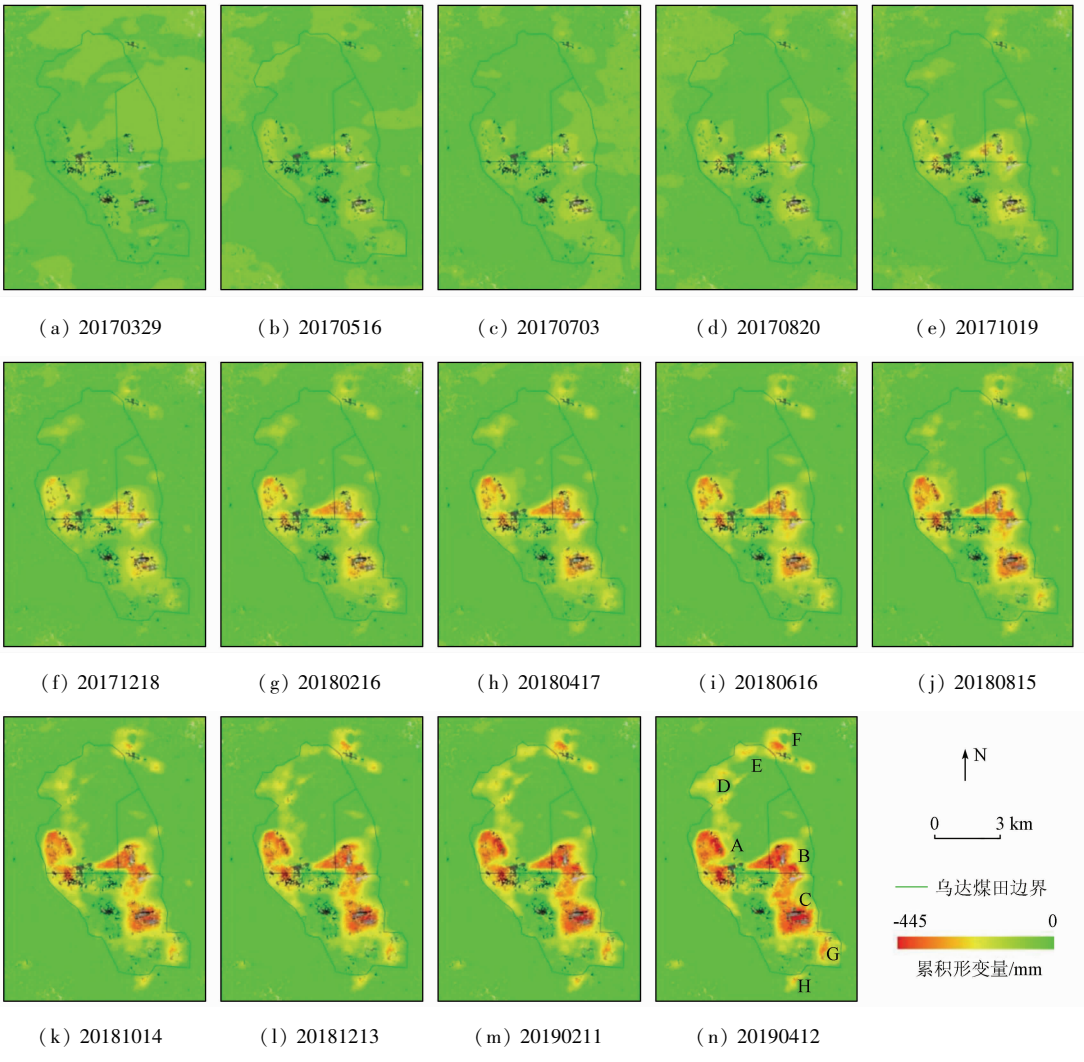


图 5 乌达煤田地表形变时序累积图

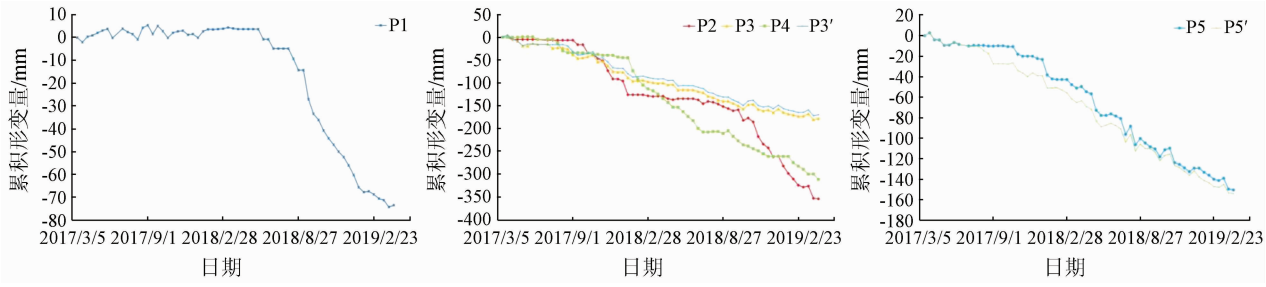
Fig. 5 Time series cumulative diagram of surface deformation in Wuda coal field

3.3 煤田火区地表形变分析

乌达煤田严重的地表形变现象主要与煤火燃烧及人工采挖有关[17,19],根据文献[7]中 2018 年 1 月底实地调查获取的部分区域的明显烟点和煤火点,这些实测的煤火点附近地区伴随着地表形变现象。为了研究煤火燃烧引起的地表形变,对实测煤火区的地表形变进行重点分析。

3.3.1 煤田火区地表形变时序分析

为分析煤田火区的时序地表形变规律,将实测煤火点编号为 H1—H6(图 3(b)),对应 D,A 和 G 这 3 个沉降区域。选取 3 个区域中实测煤火点附近且累积形变量最大的 5 个 DS 点作为特征点分析地表形变,编号记为 P1—P5(图 3(b))。为了验证特征点时序形变的可靠性,从 TCP - InSAR 监测结果中选取距离特征点最近的 TCP 点作为验证点对其进行验证,由于 TCP - InSAR 选点的原因,只在 P3 和 P5 点旁选了 P3′和 P5′点。图 6(a)—(c)分别为 D,A 和 G 这 3 个沉降区域的特征点及验证点时序形变图,特征点与验证点之间的时序形变趋势基本吻合,具有很好的一致性,2 点间的时序形变值整体存在偏大或偏小的问题,但考虑到 2 点之间具有一定的距离,属于合理范围,所以可以利用选取的特征点进行地表时序形变分析。



（a）特征点 P1 时序形变图　（b）特征点 P2,P3,P3′和 P4 时序形变图　（c）特征点 P5 和 P5′时序形变图

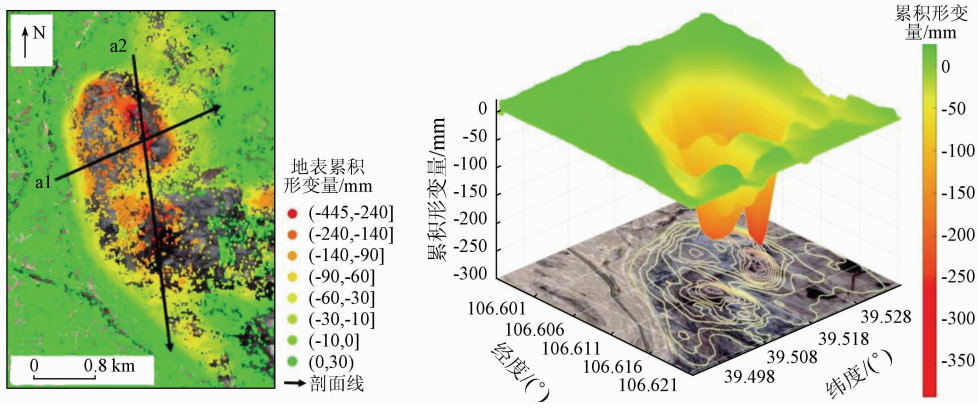
图 6　特征点时序形变图

Fig. 6　Feature point time series deformation graph

由图 6 可知,3 个沉降区域的形变量级与时序形变趋势各不相同,不同时间段地表形变变化快慢也不相同。P1 从 2018 年 5 月底才开始发生形变并持续到监测时间结束,这段时间内地表形变变化快,煤火燃烧剧烈。处于同一沉降区域的 P2,P3 和 P4 开始发生形变的时间各不相同,P2 点最晚,从 2017 年 9 月开始,并且中间一段时间因煤火处于休眠阶段未发生明显的地表形变现象; P3 点地表形变变化缓慢,但在整个监测时间段内形变持续发生; 相比之下,P4 点从 2017 年 6 月开始出现形变现象,且在之后时间段内出现了 3 个未发生形变的时期。P5 点的时序形变趋势更加复杂,多个时间段内出现形变停滞现象,但在发生形变的时期内形变变化较快。煤火区的这些复杂地表时序形变现象归因于煤火燃烧阶段的复杂性、燃烧强度的非均质性,并且可以从这些特征点时序上的地表形变变化快慢推断煤火的燃烧强度及燃烧阶段。从整体上分析这 5 个特征点时序地表形变规律,可以发现秋冬季节的地表形变变化相对较快,这是由于乌达煤田处于干旱半干旱地区,秋冬季节干旱少雨,煤层易发生火灾[23],导致地表形变变化较快。

3.3.2　典型煤火区地表形变特征分析

为分析煤田火区的地表形变特征,选取 3 个沉降区域中形变最严重的 A 区作为典型煤火区。为清晰直观地表征区域 A 地表形变的空间形态,将地表累积形变图(图 7(a))进行克里金插值,并将插值之后的图转换成三维形变图(图 7(b))。从图 7(b)可知,区域 A 的地表形变在空间上变化较快,整体形变规律复杂,边缘形状不规则,且具有多个发育程度不同的沉降中心。从三维形变图的形变等值线中可知,这些沉降中心附近的等值线密集,向四周逐渐变得稀疏,对应的沉降中心凹陷较深,向四周逐渐平缓,边缘近似长椭圆形,并且这些沉降中心的形变延伸方向随着煤火蔓延和燃烧强度而各不相同。

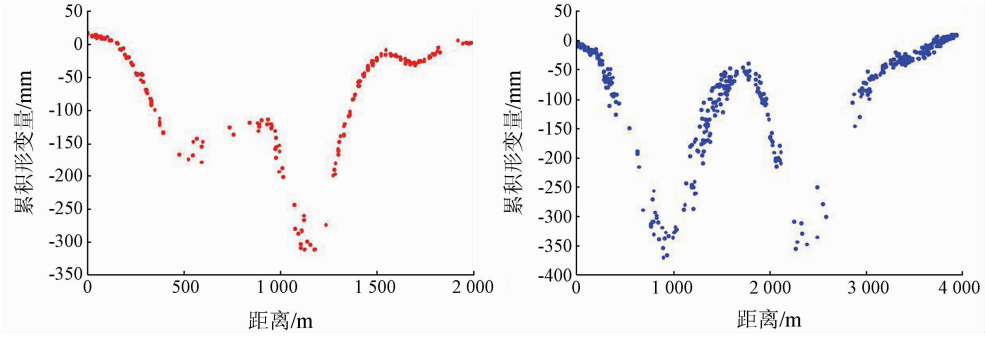


（a）剖面线示意图　（b）三维形变图

图 7　典型煤火区三维形变图

Fig. 7　Three－dimensional deformation map of typical coal fire area

为定量分析典型煤火区的地表形变特征,在图 7(a)区域 A 的沉降中心附近给出了 2 条剖面线 a1 和 a2,并沿剖面线提取地表累积形变量,结果如图 8 所示。由图 8 可知,剖面线 a1 穿过了 3 个形变量级与沉降范围大小不同的沉降中心,最严重的沉降中心累积形变量达到 －311.6 mm; 剖面线 a2 经过 2 个发育程度相似的沉降中心,最大累积形变量从左到右分别为 －369.5 mm 和 －355.2 mm; 这些沉降中心到边缘的形变量变化快,形变梯度较大。



（a）剖面线 a1 （b）剖面线 a2

图 8 典型煤火区剖面累积形变图

Fig. 8 Cumulative deformation map of the profile of a typical coal fire area

4 结论

本研究利用 DS－InSAR 对乌达煤田火区 2017 年 3 月—2019 年 4 月采集的 63 幅 Sentinel－1A 影像进行了处理，分析了长时序地表形变，得到如下结论：

1）与 TCP－InSAR 技术相比，DS－InSAR 监测点密度提高 1.24 倍，且分布均匀，能够更好地反映出研究区域的地表形变情况。研究区域存在多个形变量级与沉降范围大小不同的沉降区域，且在空间上分布不均匀，最大地表形变速率约为 －215 mm/a。

2）监测时间段内乌达煤田存在因煤火燃烧导致的地表形变。煤火区的地表时序形变规律复杂，秋冬季节地表形变变化相对较快，并且利用地表时序形变可以推断出煤火的燃烧状态，形变严重的煤火区出现多个形变延伸方向且发育程度不同的沉降中心。

3）本研究仅利用 DS－InSAR 获取的结果对乌达煤田及其煤火区的地表形变进行了分析，将来还需要与现场实测资料以及开采沉陷理论知识相结合，进一步研究煤火燃烧导致的地表形变机理，最终实现对煤田火区地表形变全面详细准确的监测。

参考文献（References）：

[1] Song Z，Kuenzer C，Zhu H，et al. Analysis of coal fire dynamics in the Wuda syncline impacted by fire－fighting activities based on in－situ observations and Landsat8 remote sensing data[J]. International Journal of Coal Geology，2015，141－142：91－102.

[2] Kuenzer C，Zhang J，Sun Y，et al. Coal fires revisited：The Wuda coal field in the aftermath of extensive coal fire research and accelerating extinguishing activities[J]. International Journal of Coal Geology，2012，102：75－86

[3] Liang Y，Liang H，Zhu S. Mercury emission from coal seam fire at Wuda，Inner Mongolia，China[J]. Atmospheric Environment，2014，83：176－184.

[4] 张志敏，江利明，柳 林，等. 利用 Landsat 热红外影像探测地下煤火区范围——以乌达煤田为例[J]. 测绘通报，2018(3)：93－97.
Zhang Z M，Jiang L M，Liu L，et al. Detecting the underground coal fire by using Landsat thermal infrared imagery：Taking Wuda coalfield as an example[J]. Bulletin of Surveying and Mapping，2018(3)：93－97.

[5] Du X，Cao D，Mishra D，et al. Self－adaptive gradient－based thresholding method for coal fire detection using ASTER thermal infrared data，part I：Methodology and decadal change detection[J]. Remote Sensing，2015，7(6)：6576－6610.

[6] 李 峰，梁汉东，赵小平，等. 内蒙古乌达煤田煤火治理效果的遥感监测与评估[J]. 国土资源遥感，2017，29(3)：217－223. doi：10.6046/gtzyyg.2017.03.32.
Li F，Liang H D，Zhao X P，et al. Remote sensing monitoring and assessment of fire－fighting effects in Wuda coal field，Inner Mongolia[J]. Remote Sensing for Land and Resources，2017，29(3)：217－223. doi：10.6046/gtzyyg.2017.03.32.

[7] Li F，Li J，Liu X，et al. Coal fire detection and evolution of trend analysis based on CBERS－04 thermal infrared imagery[J]. Environmental Earth Sciences，2020，79(16)：1－15.

[8] 蒋卫国，武建军，顾 磊，等. 基于夜间热红外光谱的地下煤火监测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析，2011，31(2)：357－361.
Jiang W G，Wu J J，Gu L，et al. Monitoring method of undergound coal fire based on nigth thermal infrared remote sensing technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis，2011，31(2)：357－361.

[9] 郑美楠，邓喀中，陈 华，等. 时序累积 DInSAR 与 GIS 结合的矿区沉降监测与分析[J]. 煤矿安全，2017，48(1)：160－163.
Zheng M N，Deng K Z，Chen H，et al. Monitoring and analysis of mining subsidence base on timing accumulation DInSAR and GIS[J]. Safety in Coal Mines，2017，48(1)：160－163.

[10] 赵立峰，范洪冬，渠俊峰，等. 基于 DS－InSAR 的张双楼煤矿长时序地表形变监测方法[J]. 金属矿山，2021(8)：142－149.
Zhao L F，Fan H D，Qu J F，et al. Long time－series surface deformation method of Zhangshuanglou coal mine based on DS－InSAR[J]. Metal Mine，2021(8)：142－149.

[11] Voigt S，Tetzlaff A，Zhang J，et al. Integrating satellite remote sensing techniques for detection and analysis of uncontrolled coal seam fires in North China[J]. Elsevier，2004，59(1－2)：121－136.

[12] Xu Y，Fan H，Dang L. Monitoring coal seam fires in Xinjiang using comprehensive thermal infrared and time series InSAR detection[J]. International Journal of Remote Sensing，2021，42(6)：2220－2245.

[13] Liu J,Wang Y,Yan S,et al. Underground coal fire detection and monitoring based on Landsat8 and Sentinel – 1 data sets in Miquan fire area,Xinjiang[J]. Remote Sensing,2021,13(6):1141.

[14] 许 怡,范洪冬,党立波. 基于 TIRS 和 TCP – InSAR 的新疆广域煤田火区探测方法[J]. 金属矿山,2019(10):164 – 171.
Xu Y,Fan H D,Dang L B. Detection method of fire area in Xinjiang wide area coalfield based on TIRS and TCP – InSAR[J]. Metal Mine,2019(10):164 – 171.

[15] Liu J,Wang Y,Li Y,et al. Underground coal fires identification and monitoring using time – series InSAR with persistent and distributed scatterers:A case study of Miquan coal fire zone in Xinjiang,China[J]. IEEE Access,2019,7:164492 – 164506.

[16] Riyas M,Syed T,Kumar H,et al. Detecting and analyzing the evolution of subsidence due to coal fires in Jharia coalfield,India using Sentinel – 1 SAR data[J]. Remote Sensing,2021,13(8):1521.

[17] Zhou L,Zhang D,Wang J,et al. Mapping land subsidence related to underground coal fires in the Wuda coalfield (Northern China) using a small stack of ALOS PALSAR differential interferograms [J]. Remote Sensing,2013,5(3):1152 – 1176.

[18] 黄昭权,张登荣,王 帆,等. 基于差分干涉 SAR 的煤田火区地表形变监测[J]. 国土资源遥感,2010,22(4):85 – 90. doi:10.6046/gtzyyg.2010.04.18.
Huang Z Q,Zhang D R,Wang F,et al. Differential SAR interferometry for the monitoring of underground coal spontaneous combustion zone surface deformation[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2010,22(4):85 – 90. doi:10.6046/gtzyyg.2010.04.18.

[19] Jiang L,Lin H,Ma J,et al. Potential of small – baseline SAR interferometry for monitoring land subsidence related to underground coal fires:Wuda (Northern China) case study[J]. Remote Sensing of Environment,2011,115(2):257 – 268.

[20] Ferretti A,Fumagalli A,Novali F,et al. A new algorithm for processing interferometric data – stacks:SqueeSAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2011,49(9):3460 – 3470.

[21] Jiang M,Ding X,Hanssen R F,et al. Fast statistically homogeneous pixel selection for covariance matrix estimation for multitemporal InSAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2014,53(3):1213 – 1224.

[22] Cao N,Lee H,Jung H C. Mathematical framework for phase – triangulation algorithms in distributed – scatterer interferometry[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2015,12(9):1838 – 1842.

[23] 张建明,管海晏,曹代勇,等. 中国地下煤火研究与治理[M]. 北京: 煤炭工业出版社,2008:12 – 21.
Zhang J M,Guan H Y,Cao D Y,et al. Underground coal fires in China:Origin,detection,fire – fighting,and prevention[M]. Beijing:China Coal Industry Publishing House,2018:12 – 21.

DS – InSAR – based monitoring and analysis of a long time series of surface deformation in the fire area of the Wuda coal field

LI Zhu[1], FAN Hongdong[1], GAO Yantao[2], XU Yaozong[1]

(1. *Engineering Research Center of Ministry of Education for Mine Ecological Restoration, China University of Mining and Technology, Xuzhou* 221116, *China*; 2. *Institute of Surveying Mapping and Geoinformation, Henan Bureau of GEO – Exploration and Mineral Development, Zhengzhou* 450006, *China*)

Abstract: Coal fire not only wastes a lot of coal resources but also severely damages the ecological environment of the fire area. However, conventional monitoring methods suffer disadvantages such as a small scope, low frequency, high cost, and great danger. Therefore, this study developed a monitoring method of coal field fire based on the distributed scatterer interferometric synthetic aperture Radar (DS – InSAR) technology. This method successively selects homogeneous pixels using the fast statistically homogeneous pixels selection (FaSHPS) algorithm, optimizes the phases of these pixels using the eigenvalue decomposition method, obtains the final distributed targets based on the temporal coherence, and calculates the time – series surface deformation by combining the small baseline subsets (SBAS) InSAR technique. Taking 63 scenes of Sentinel – 1A images from March 2017 to April 2019 as the data source, this study obtained the time series surface subsidence in the Wuda coal field using this method and then verified the reliability of the results by comparison with the monitoring results obtained using the temporarily coherent point interferometric synthetic aperture Radar (TCP – InSAR) technology. As a result, the correlation coefficient between the two methods was 0.84, but the density of monitoring sites obtained using the method proposed in this study was 1.24 times higher than that of TCP – InSAR. The monitoring results show that the surface of the Wuda coal field deforms severely, with a maximum deformation rate of –215 mm/a, and that the deformation occurs more rapidly during autumn and winter and has multiple extensional directions and multiple subsidence centers at varying degrees.

Keywords: DS – InSAR; deformation monitoring; coal fire monitoring; long time series; fire area of Wuda coal field

(责任编辑: 陈 理)