

南水北调中线焦作采空区地表沉降DS-InSAR监测与风险分析

张子彦¹, 张敬凯², 张豪磊¹, 杜玉玲¹, 闫世勇¹

1. 中国矿业大学 自然资源部国土环境与灾害监测重点实验室, 徐州 221116;

2. 河南省资源环境调查五院, 郑州 450053

摘要: 南水北调中线工程是优化水资源配置和促进区域协调发展的国家战略性工程, 为及时发现和评估沿线煤炭开采沉陷对南水北调中线干渠的威胁, 本文基于 Sentinel-1A 数据和分布式散射体合成孔径雷达干涉测量 (DS-InSAR) 技术, 通过同质像元识别和相位优化将分布式目标融入时序 InSAR 处理, 获取了焦作采空区 2019 年—2020 年地表形变时空分布, 在此基础上结合形变和距离要素构建了一种南水北调沿线形变风险评估指标, 并依据指标实现了研究区形变风险分级。结果显示, 焦作采空区内存在多个沉降盆地, 其中最大沉降量达到 180 mm, 最大形变速率约为 -125 mm/a; 南水北调干渠沿线以无风险区和低风险区为主, 伴随有少量中高风险区。研究表明南水北调中线干渠焦作段整体受开采沉陷影响较小, 但在张屯矿西北侧、白庄矿和中马村矿内存在较高形变风险区域, 需要对其进行持续监测以预防潜在沉陷灾害。本文提出的基于形变信息的风险指标具有良好的指示性, 能够为南水北调灾害风险评估提供科学依据。

关键词: 遥感, 采空区, DS-InSAR, 地表形变监测, 南水北调中线, 风险指标

中图分类号: P237/P2

引用格式: 张子彦, 张敬凯, 张豪磊, 杜玉玲, 闫世勇. 2024. 南水北调中线焦作采空区地表沉降 DS-InSAR 监测与风险分析. 遥感学报, 28(4): 900-910

Zhang Z Y, Zhang J K, Zhang H L, Du Y L and Yan S Y. 2024. Monitoring and risk analysis of surface subsidence in the Jiaozuo Goaf along the middle route of the South-to-North Water Diversion Project based on the DS-InSAR method. National Remote Sensing Bulletin, 28(4): 900-910 [DOI: 10.11834/jrs.20242229]

1 引言

南水北调工程作为中国规模最大的战略性水利设施, 有效缓解了北方地区水资源严重短缺局面, 对国家水资源优化配置, 促进经济社会可持续发展具有重要意义 (汪易森和杨元月, 2005)。中线工程自丹江口水库起始, 途经河南、河北、天津, 最后达到北京, 累积输水量超过 400 亿 m³, 已成为京津冀豫沿线大中城市主力水源 (王菡娟, 2021)。然而, 由于中线干渠沿线存在大量膨胀土、地下水过度开采区域以及煤炭采空区, 地表形变已成为危害南水北调中线工程正常运行的潜在威胁 (Du 等, 2021)。地表沉降会使得水流坡降变缓, 流速减慢, 从而使得输水量达不到标准要

求, 大量级的地表沉降甚至会导致渠道产生明显变形, 使得渠堤失稳 (李永新, 2016)。

水准和 GNSS 等传统形变监测方法测量精度较高, 但存在空间采样不足和成本高等缺陷, 难以大范围有效应用。合成孔径雷达差分干涉测量 (D-InSAR) 技术则不受地形环境等因素的影响, 能够获取广域地表形变, 被广泛应用于矿区沉陷 (董建军 等, 2022; Fan 等, 2014)、冰川流动 (杨丽叶 等, 2020)、滑坡和火山灾害 (谢谟文 等, 2012; 王桂杰 等, 2010) 等, 马超等 (2014) 利用 D-InSAR 技术监测南水北调中线豫北段沿线地表沉陷, 但受限于失相干和大气延迟干扰, D-InSAR 通常仅能获取厘米级形变。而时序 InSAR 技术借助高相干点目标弥补了相关不足, 可实现毫

收稿日期: 2022-05-06; 预印本: 2022-09-29

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2022YFE0102600); 国家自然科学基金 (编号: 42004011, 41876226)

第一作者简介: 张子彦, 研究方向为 InSAR 技术应用。E-mail: ts21160055a311d@cumt.edu.cn

通信作者简介: 闫世勇, 研究方向为 InSAR 形变监测与环境灾害遥感。E-mail: yanshiyong@cumt.edu.cn

米级地表形变监测 (Osmanoglu 等, 2016)。目前主流的时序 InSAR 方法以单一主影像的 PS-InSAR (Ferretti 等, 2001) 和多主影像的 SBAS-InSAR (Berardino 等, 2002) 两种方法为主, 并在南水北调中线采空区和膨胀土区域以及渠堤形变分析中得以应用 (田凡, 2020; Dong 等, 2021; 张永光 等, 2021)。由于矿区地表覆盖多为植被、裸土和沙地等, 传统高相干点目标稀少, 极大地限制了时序 InSAR 技术在矿区等低相干区整体沉降监测中的应用。融合分布式目标的 DS-InSAR 技术则能够通过同质像元识别和相位优化, 有效增加监测点数量, 进一步扩展了时序 InSAR 技术在矿区 (蒋金雄 等, 2021)、铁路沿线 (杨嘉威 等, 2021)、水利设施 (徐东彪 等, 2020) 等区域地表形变监测中的应用。因此本文使用 DS-InSAR 方法开展南水北调中线焦作段沿线采空区地表沉降特征研究, 并深入分析了其对南水北调中线的潜在威胁。

2 DS-InSAR 方法

2.1 同质像元识别

同质像元识别是 DS-InSAR 技术分布式目标提取的核心内容之一, 也是相位优化的基础 (鹿璐, 2020)。基于时序特征的统计分析方法是当前同质像元识别的常用方法 (李毅, 2019), 其中双样本 t 假设检验在小样本下具有较好的计算效率和鲁棒性 (Shamshiri 等, 2018)。本文采用双样本 t 假设检验, 根据其显著性差异水平来判断像元是否为同质像元, 双样本 t 假设检验的原假设和备则假设如下:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2, H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \quad (1)$$

式中, μ_1 和 μ_2 分别是 2 个样本中 SAR 影像振幅的均值, 样本的检验统计表示如下:

$$t = \frac{\bar{A}(P_1) - \bar{A}(P_2)}{\sqrt{\frac{\sigma^2(P_1) + \sigma^2(P_2)}{N}}} \quad (2)$$

式中, t 为样本的检验统计量, 其服从 t 分布, P_1 和 P_2 为待检验的两个像元, $\bar{A}(P)$ 为该像元样本振幅均值, $\sigma^2(P)$ 为像元 P 的样本振幅方差, N 表示样本容量。本文将显著性水平设置为 95%, 当同

质像元的数量超过 20 时, 将该像元选为分布式目标备选像元 (DSC)。

2.2 相位优化

同质像元的复相干矩阵服从复 Wishart 分布, 是开展相位优化的基础前提。假设 n 为 SAR 影像数量, l 为同质像元数量, 则复相干矩阵可通过式 (3) 计算。

$$T = \frac{ZZ^H}{\sqrt{\|Z\|^2(\|Z\|^2)^T}} \quad (3)$$

式中, T 为样本复相干矩阵, Z 为 $n \times l$ 的同质像元矩阵, 式中 $\|\cdot\|$ 为对矩阵行进行的范数操作。上标 T 为矩阵转置操作符。

本文使用基于特征分解的干涉相位最大似然估计方法 (EMI) (Ansari 等, 2018) 实现相位优化。EMI 方法是对相位三角算法 (PTA) 方法的推广, 通过引入拉格朗日乘子以使用特征分解进行求解, 兼具准确度和计算效率。EMI 通过最大化 Wishart 似然分布实现对复相干矩阵的估计, 计算公式如下:

$$\hat{\Sigma} = \arg \max_{\Sigma} \{ \ln(p(T|\Sigma)) \} = \arg \min_{\phi, \sigma, \alpha} \left\{ \alpha^{-2} \zeta^H (\Gamma^{-1} \circ T) \zeta - \sum_{i=1}^n \ln((\alpha \sigma_i)^{-2}) \right\} \quad (4)$$

式中, Γ 为相干性矩阵, 等价于 $|T|$, ϕ 为优化相位, ζ 为优化相位的倒数, α 和 σ 为尺度参数, 为 Γ 的校准提供了额外的自由度。对式 (4) 中的 $\ln((\alpha \sigma_i)^{-2})$ 用泰勒级数线性化, 并通过拉格朗日乘数法添加 σ 的范数约束, 从而将待求解式转为

$$(\Gamma^{-1} \circ T) \hat{\zeta} = \lambda \hat{\zeta} \quad (5)$$

式 (5) 可通过特征分解的方法, 求得最小特征值对应的特征向量并用特征向量的相位替代原像元的相位, 从而实现相位的优化, 特征值 λ 能够反映残余相位误差, 是衡量相位优化质量的重要指标, 其越接近 1, 则相位估计越准确。

通过设定时间相干系数阈值, 选出并融合 DS 和 PS 目标后, 根据时序 InSAR 数据处理的基本流程完成相位解缠和大气延迟等误差校正, 最后得到研究区形变信息, DS-InSAR 数据处理流程如图 1 所示。

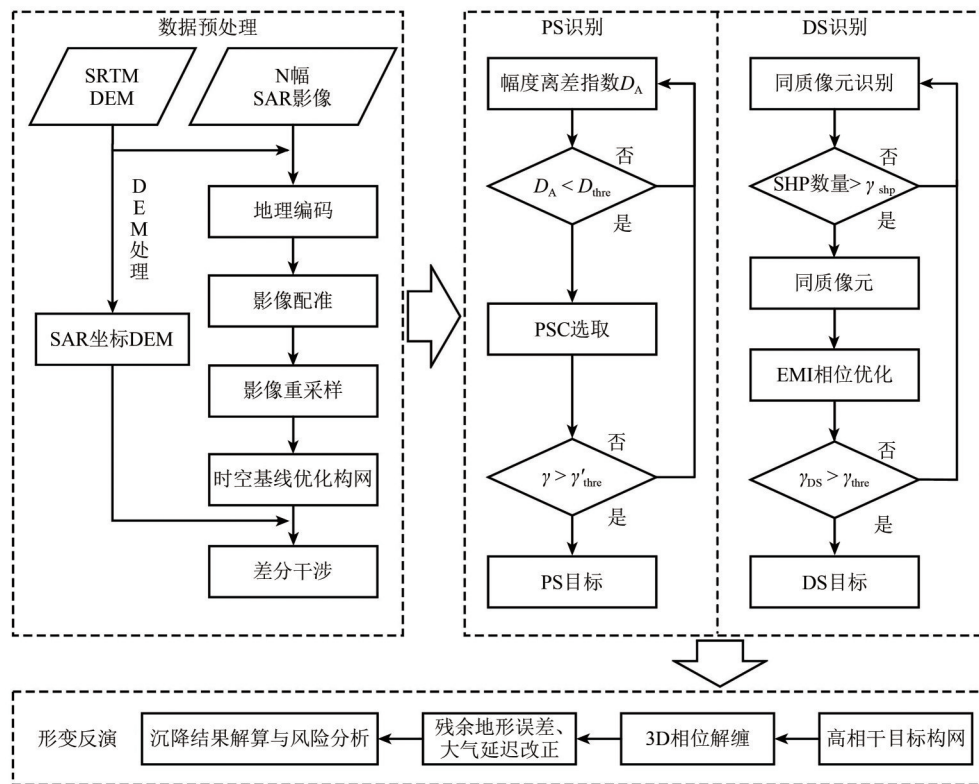


图1 DS-InSAR 技术流程

Fig. 1 DS-InSAR technical process

3 研究区与数据源

3.1 研究区概况

南水北调中线焦作段位于焦作市东北部区域(图2),地表以农田、裸土为主,地层主要为第四

系黄土状土、粘性土及卵石层,下伏基岩为二叠、石炭、奥陶系碎屑岩和碳酸盐岩,焦作煤炭资源丰富,主采煤层为二叠系下统山西组底部(赵旻等, 2007),开采带来的沉陷对地表造成了极大破坏,严重威胁着南水北调工程等基础设施的安全运行。

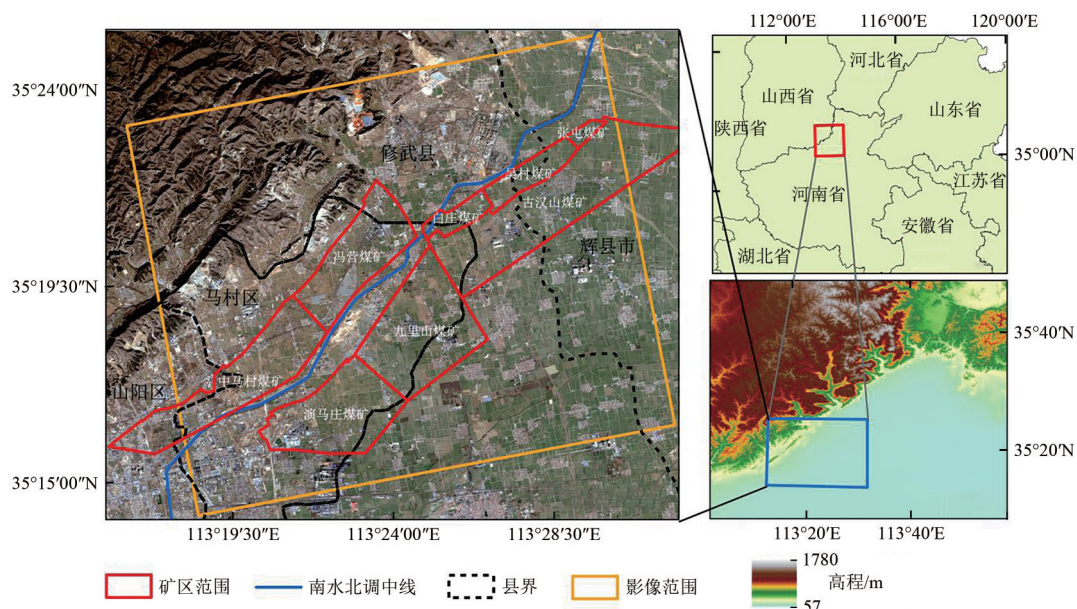


图2 焦作矿区地理位置

Fig. 2 Geographic location of Jiaozuo mining area

3.2 数据源

欧洲航天局 Sentinel-1A 卫星 TOPS 成像模式具有重访周期短、覆盖范围大和现势性强等特点,且可以免费下载使用,因此本文共选取 Sentinel-1A 卫星在 2019 年 1 月 8 日至 2020 年 11 月 10 日期间获取的 54 景 IW 模式升轨 SAR 影像数据,为了保障生成差分干涉图质量,根据多基线原则,设置时间基线阈值为 24 d,空间基线阈值为 200 m,共组成 98 个干涉对 (图 3)。

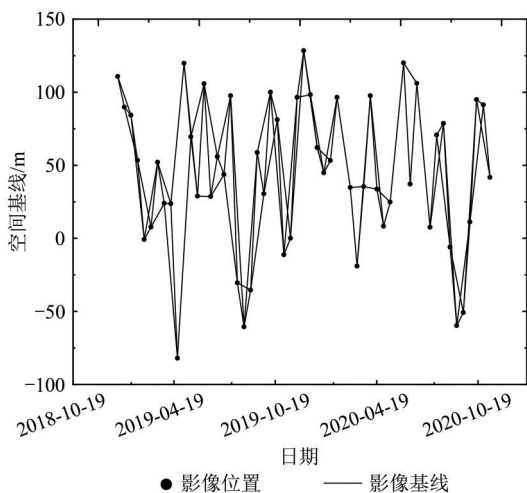


图 3 Sentinel-1 SBAS 方法干涉对时空基线

Fig. 3 Spatio-temporal baselines of interferometric image pairs for Sentinel-1 SBAS method

4 结果与分析

4.1 沉降监测结果

本文基于 54 景 Sentinel-1A 影像和 DS-InSAR 方法得到了南水北调中段沿线焦作矿区在 2019 年—2020 年的形变分布图 (图 4), 共获取有效观测点 576743 个且空间分布较为均匀, 地表形变速率主要分布在 $-101 \sim 20$ mm/a。形变分布图直观表明研究区内分布有多个明显的沉降中心 (A—E), 总体上沿南水北调干渠分布, 且位于矿区开采范围内。

4.2 典型沉降区域分析

沉降区域 A (图 5 (a)) 位于修武县东北部, 从相应的光学影像 (图 5 (b)) 判读可知此处为大型排土场, 且其东北部存在居民区。排土场的边坡通常为结构较为松散的土石混合成废土, 被压实后坡面易发生失稳 (马力 等, 2022), 因此有必要对其进行沉降监测。从图 5 (a) 中看到排土场沉降呈规则分布, 为分析其沉降的时空演化过程, 分别沿图 5 (a)

中剖面线 pp' 和 qq' 提取时序累积沉降信息, 见图 5 (c)、(d)。形变监测结果表明排土场在 2019 年 11 月前没有发生明显形变, 而在这之后中心沉降开始加速, 沉降范围逐渐由排土场的中心区域向四周扩散, 沉降漏斗开始成型。截止到 2020 年 10 月, 堆土场中心沉降量已达到 -170 mm, 星形标记点形变速率达到 -114 mm/a, 沿剖面线沉降范围与排土场长宽基本一致, 均超过 0.5 km, 且存在持续下沉趋势, 因此有必要开展持续形变监测以预防潜在滑坡灾害。

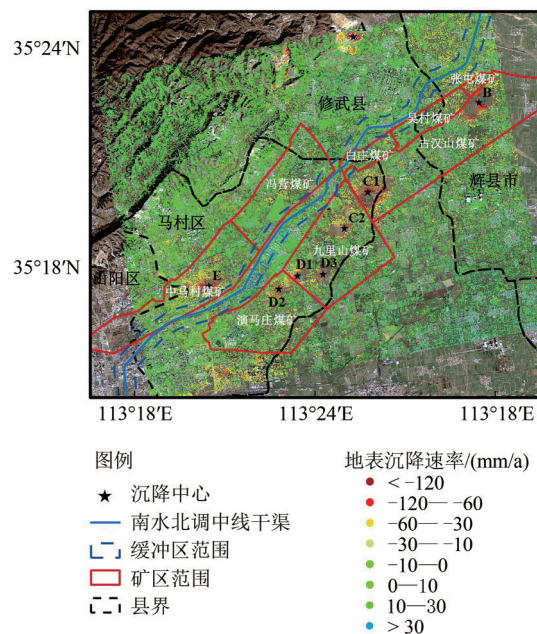


图 4 焦作矿区平均形变速率(LOS)

Fig. 4 Average deformation Rate (LOS) in Jiaozuo mining area

沉降中心 B 位于辉县市西部吴村煤矿、张屯煤矿和古汉山煤矿的交界处 (图 6 (a)), 盆地中心平均形变速率为 -102 mm/a。为分析南水北调中线干渠与采空区沉降的空间关系, 在南水北调中线干渠两侧做宽度为 500 m 的缓冲区, 并沿图中 uu' 剖面线提取时序累积形变, 如图 6 (b) 所示, 图中灰色区域为缓冲区在剖面上的位置分布, 蓝色实线为干渠所在位置。沿剖面线 uu' 有两个沉降盆地, 其中一个位于缓冲区内, 紧靠干渠, 在监测时段内的累积形变量达到 -40 mm, 中心点时序形变见图 6 (b) 中子图。结合剖面图和沉降中心点的时序形变特征分析, 在 2020 年 7 月后小型漏斗处有小幅抬升现象, 但在此后地表仍有下沉可能, 因此需持续监测, 做好预防措施。沉降盆地 B 最大沉降量近 -140 mm, 但沉陷区距离干渠约 1 km, 对南水北调中线工程的直接影响有限。

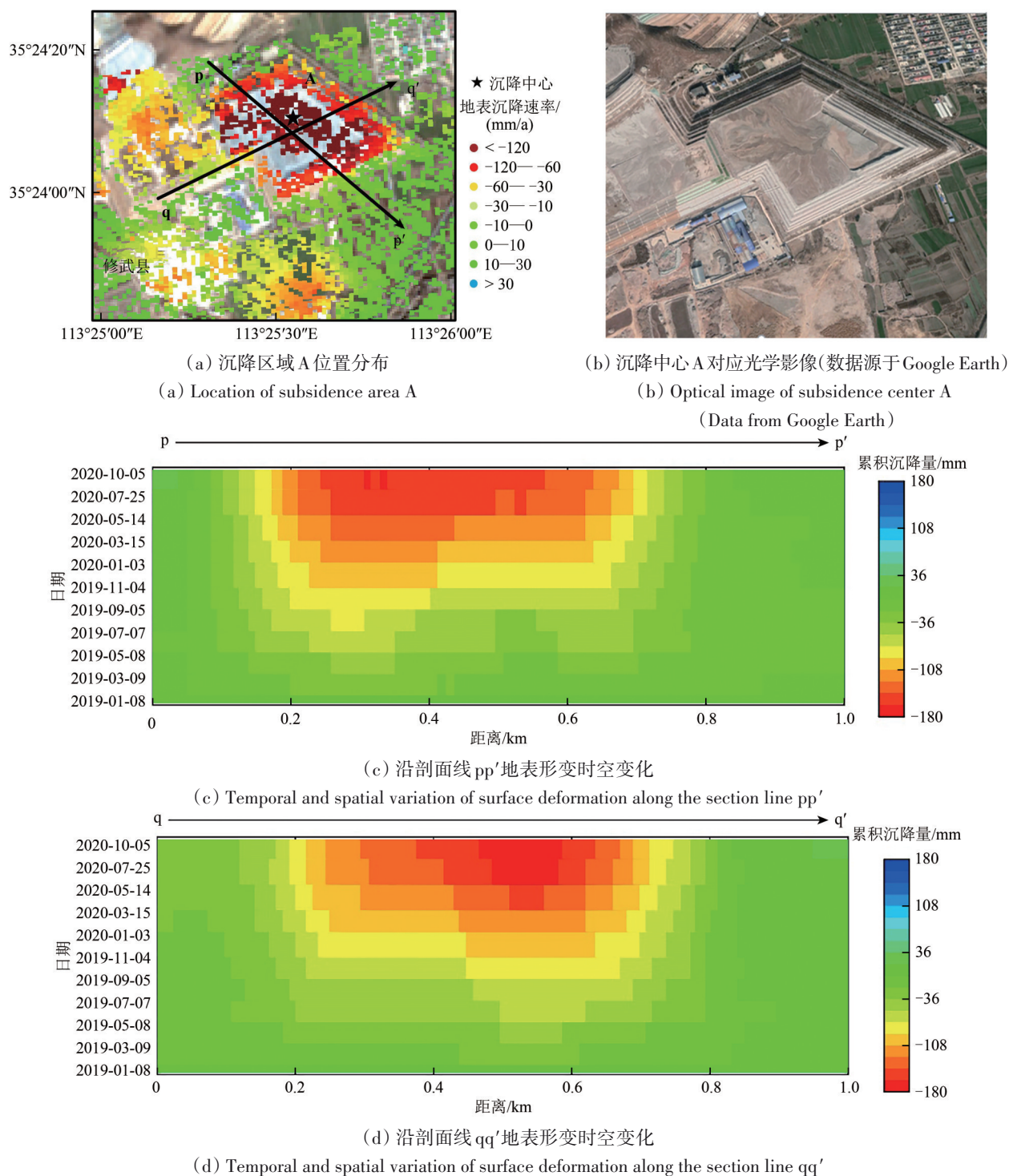


图5 沉降区域A时空形变分析
Fig. 5 Analysis of spatio-temporal deformation in subsidence area A

沉降盆地C1和C2分别位于古汉山煤矿西部和九里山煤矿东北部(图7(a)),相应标记点处平均形变速率分别为 -126 mm/a 和 -75 mm/a 。为进一步分析沉降盆地对南水北调中线干渠的影响,沿图7(a)中的剖面线ss'和tt'分别获取沉降盆地C1和C2的时序形变信息,如图7(b)(c)所示。

由图7(b)(c)可知南水北调干渠缓冲区内,地

表形变整体呈平稳趋势。在监测时间段内,盆地C1和C2沉降发育明显,至2020年11月,两处沉降盆地的最大累积沉降量分别为 -186 mm 和 -154 mm ,相比之下,沉降盆地C1在沉降量级和沉降范围方面都略大于沉降中心C2,且与南水北调干渠距离更近,虽然这两个沉降盆地边界都很接近缓冲区,但目前均没有向干渠延伸的趋势,对南水北调中线的影响较小。

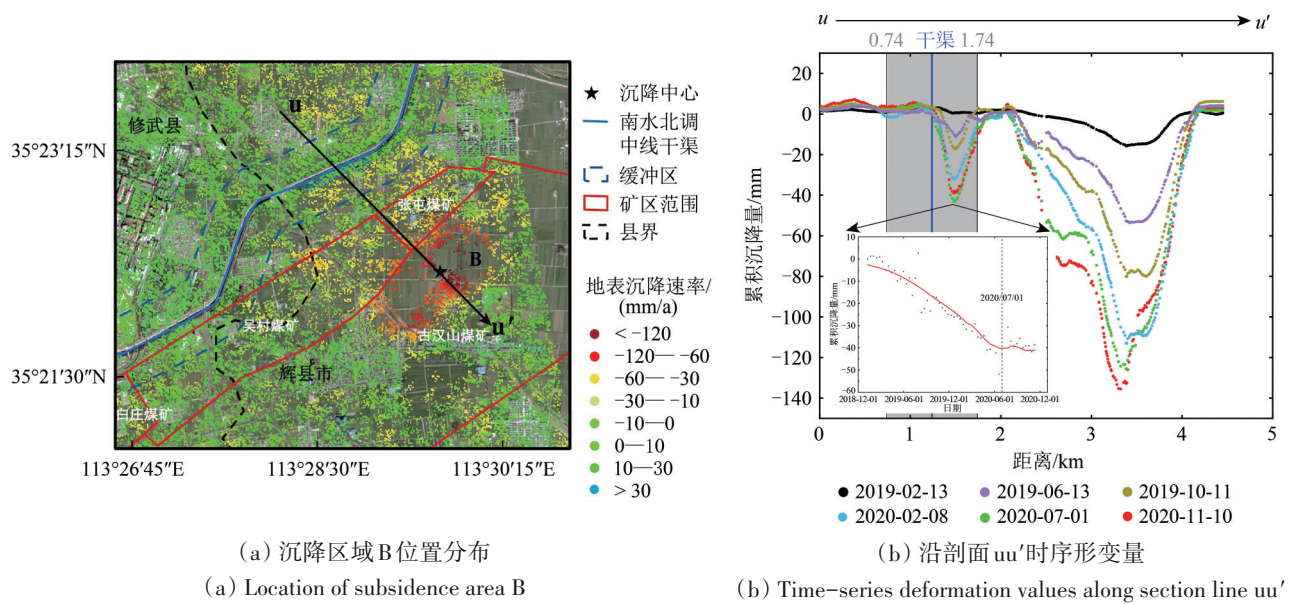


图6 沉降区域B时空形变分析

Fig. 6 Analysis of spatio-temporal deformation in subsidence area B

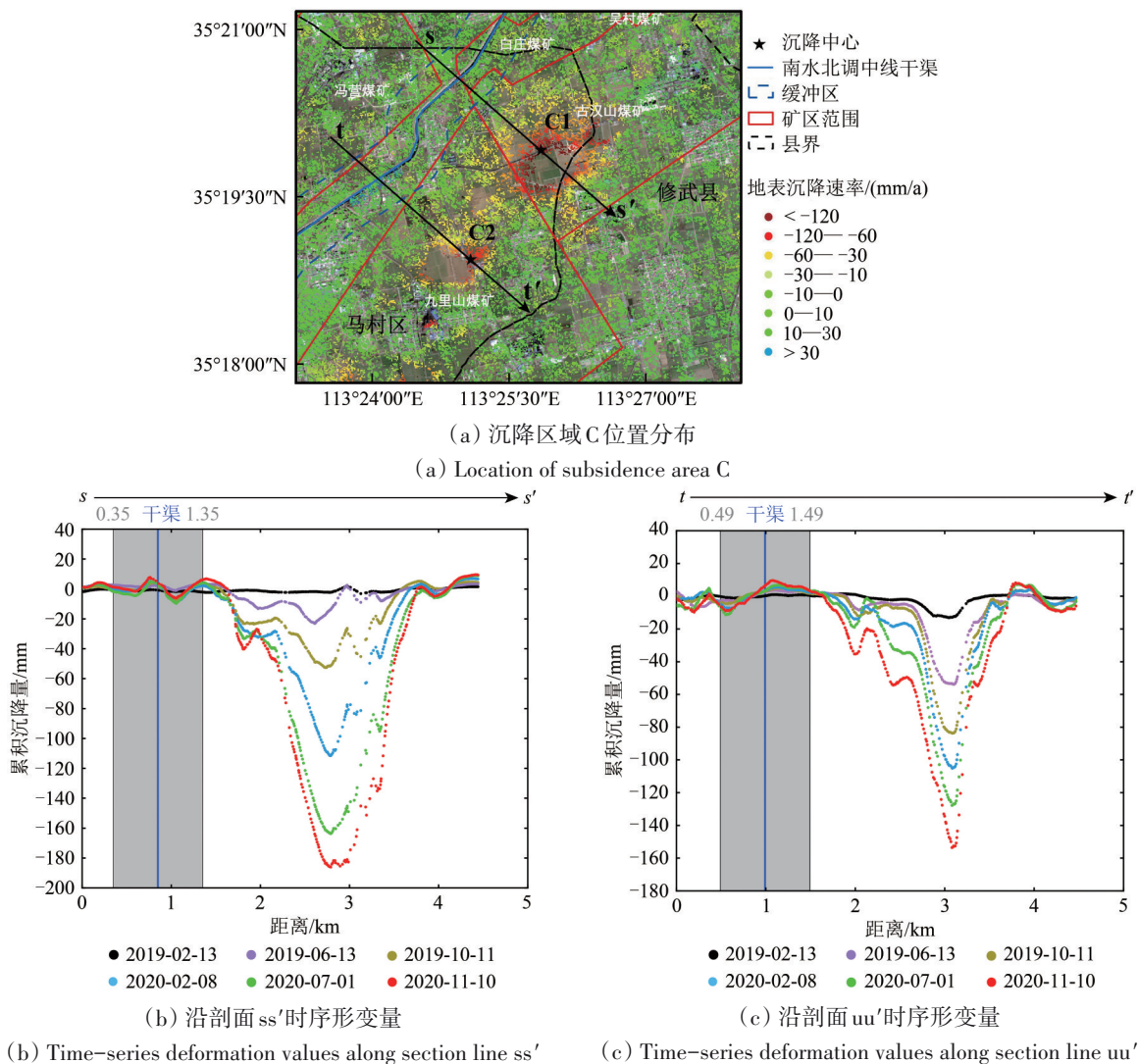
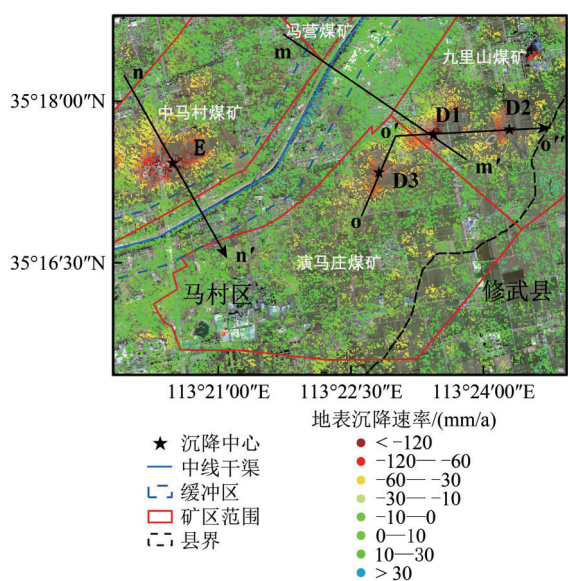


图7 沉降区域C时空形变分析

Fig. 7 Analysis of spatio-temporal deformation in subsidence area C

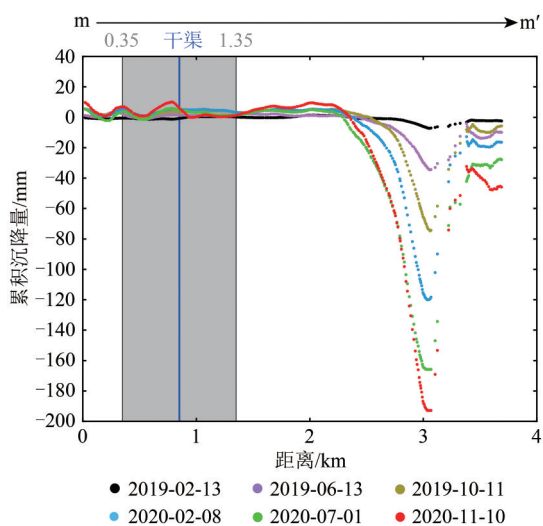
沉降区域D和沉降区域E均位于马村区中部(图8)。D区域分布有3个较小的沉降盆地D1、D2、D3,其中沉降盆地D1和D2均在九里山煤矿范围内,D3则在演马庄矿内。3个沉降盆地之间彼此相邻,为对比这3个沉降盆地的规模大小和沉降状况,沿图8(a)中的折线剖面o-o'-o''提取累积沉降量和平均形变速率剖面(图8(b)),可见3个

明显的沉陷区,依次对应沉降盆地D3、D1、D2,其中沉降盆地D3范围内的形变速率较低,对应的星形标记点的平均形变速率为-53 mm/a,最大累积沉降约-100 mm,而沉降盆地D1和D2中星形标记处的平均形变速率分别为-96 mm/a和-86 mm/a,最大沉降量均超过-180 mm。



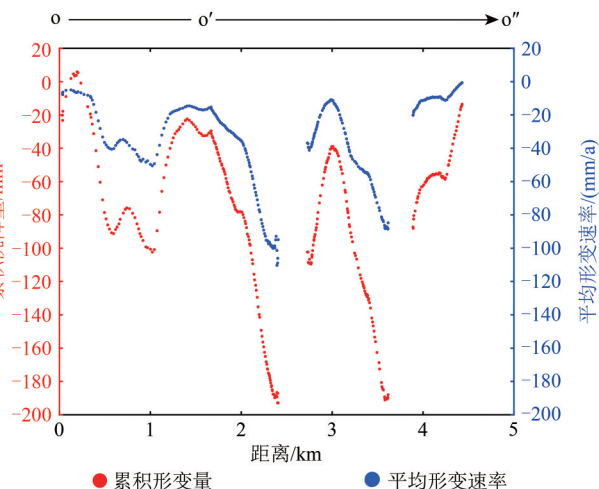
(a) 沉降区域D、E位置分布

(a) Location of subsidence areas D and E



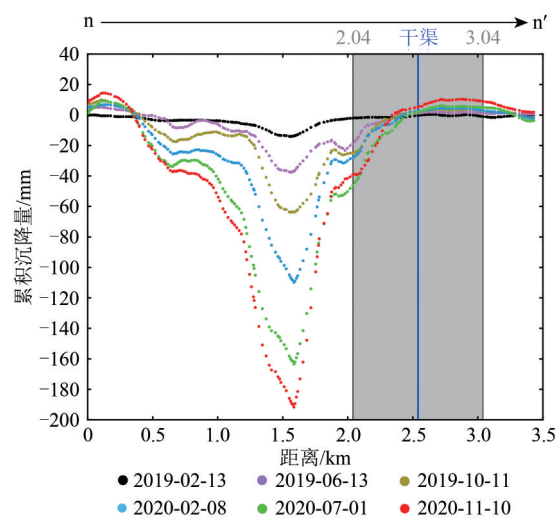
(c) 沿剖面mm'时序形变量

(c) Time-series deformation values along section line mm'



(b) 沿折线剖面o-o'-o''形变速率和累积形变量

(b) Deformation rate and cumulative deformation values along the section line o-o'-o''



(d) 沿剖面nn'时序形变量

(d) Time-series deformation values along section line nn'

图8 沉降区域D、E时空形变分析

Fig. 8 Analysis of spatio-temporal deformation in subsidence area D and subsidence area E

根据图8(a)中的3个沉降区域的空间位置分布,推测沉降盆地D3虽然距离南水北调干渠较近,但形变速率慢,沉降量较小,对南水北调工

程的影响有限,而沉降盆地D2虽然沉降量级较大,但距离干渠过远,对南水北调工程的影响程度不如沉降盆地D1,沿剖面mm'获取穿过D1沉降

中心的时序形变(图8(c)),其在缓冲区内几乎没有地表沉降。可见,虽然沉降盆地D1的中心沉降量级较大,但影响范围较小,沉降盆地边界距离缓冲区约1 km,且沿剖面沉降范围基本不变,对南水北调中线工程影响甚微。

沉降盆地E处于中马村矿内,图8(a)中能够看到该沉降盆地与干渠距离非常接近,中心星形标记处沉降速率达到 -89 mm/a ,由图8(d)中剖面可知,该沉降盆地已影响到缓冲区,中心沉降量接近 -190 mm ,沉降中心距离干渠不足1 km。虽然干渠处尚无地表沉降,但若沉降盆地范围扩大,极有可能危害到南水北调工程的正常运行。因此后续需要对该沉降盆地进行重点监测,采取相关措施进行矿区地表塌陷治理,同时做好南水北调中线工程的防护工作。

4.3 南水北调中线形变风险评估

为了能够直观指示南水北调受采空区地表形变的威胁程度,本文在上述沉降中心时空演变及其与干渠空间关系分析的基础上,基于形变和距离

因素定义了风险指标,有助于南水北调中线工程沿线形变危险性可视化分析,具体计算公式如下:

$$r = (|S| + |V| + A) \cdot e^{-D} \quad (6)$$

式中, r 为风险指数, S 为地表累积形变量, V 为地表形变速率, D 为与南水北调中线干渠的距离, A 为形变加速度,且 $A = \frac{\Delta|V|}{\Delta t}$, $\Delta|V|$ 为在时间间隔 Δt 内形变速率的改变量,在此处使用2019年至2020年形变速率进行计算。为使得上式计算具有意义,需要对相应参数进行无量纲化。本文使用重分类方法将 $|S|$ 、 D 、 $|V|$ 的值均缩放至 $[0, 9]$, A 缩放至 $[-9, 9]$ 。其中 $|S|$ 、 $|V|$ 、 A 采用等间距的重分类策略, D 则采用二次项函数计算分位数。由式(6)可知,随着距离增长,风险指标呈指数式下降,而在近距离内形变影响将被放大,此时指标大小主要受形变控制。

依据本文形变监测结果计算风险指标,并采用自然间断点法进行分类,得到研究区内形变风险等级分布,如图9所示。

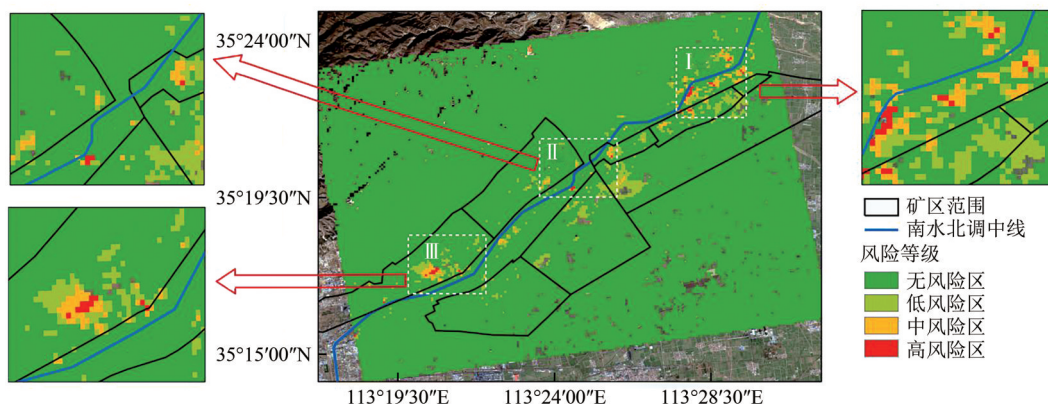


图9 南水北调中线形变风险区划

Fig. 9 Deformation risk area of the middle route of SNWDP

从风险等级图中可以看到,南水北调中线焦作段沿线以无风险区和低风险区为主,中高风险区主要集中在3个区域,分别用I、II、III标识(图9)。区域I内的中高风险区位于张屯矿和吴村矿北侧,紧贴南水北调干渠分布,与图6(b)中监测到的小量级沉降漏斗在空间上吻合,由于高风险区范围较大,受影响干渠长度达3300 m,应重点监测并做好防护措施。II区域内高风险区较少,但在白庄矿内中风险区较为集中。图7(a)中可以看到各中高风险区对应区域存在中小量级

的地表沉降,由于距离干渠较近,存在一定风险隐患,因此风险等级较高。III区域内中高风险区较为集中,其风险等级分布与图8(a)中沉降盆地E发育状况相似,且在空间上具有极高一致性,推断该风险区主要受沉降盆地E控制,因此需要时刻关注该沉降盆地的演变趋势,采取相应措施对地表形变进行治理,避免南水北调工程受其影响。

另外,前文对各沉降中心对南水北调工程影响的分析结果与图9中风险区域分布大体上一致,体现出该风险指标的准确性。而在图9的区域II中

存在3.2节剖面分析中尚未发现的中高风险区域,说明通过风险指标来评估形变对南水北调干渠的影响更加全面可靠。

5 结 论

本文基于DS-InSAR技术,利用54景Sentinel-1A数据获取了2019年—2020年内焦作采空区地表形变及其时空分布特征,在此基础上联合与南水北调中线干渠的距离构建形变风险评估指标对南水北调沿线开采沉陷威胁水平进行分级,进而分析了焦作矿区地表形变对南水北调中线干渠的影响,主要结论如下:

(1) 本研究使用t假设检验方法识别同质像元,并通过基于特征分解的干涉相位最大似然估计方法提高干涉相位信噪比,进而将分布式目标融入时序InSAR技术,可大幅提高观测点的数量和空间连续性,实现研究区地表形变精细监测,表明DS-InSAR技术在南水北调沿线和矿区形变监测方面具有较好的适用性。

(2) DS-InSAR结果中共识别出8个沉降中心,地表形变速率主要分布在 $-101\sim 20$ mm/a,最大形变速率达 -126 mm/a。除一处沉降中心为排土场外,其余沉降中心均位于矿区内且整体上沿南水北调干渠分布,与煤矿开采有较强的时空相关性。各沉降中心地表形变均呈现持续下沉趋势,其沉降范围普遍没有向南水北调中线干渠扩张迹象,说明南水北调中线干渠目前受开采沉降影响较小。但由于部分沉降中心与南水北调干渠距离较近,仍存在较高风险。

(3) 基于风险指标的胁迫分级方法能够直观地指示形变区对南水北调干渠的影响等级。根据风险区域分级结果发现,在张屯煤矿西北侧、白庄煤矿、古汉山煤矿以及中马村煤矿内均存在中高风险区域,有必要对其进行持续形变监测,采取相应防护措施保障南水北调干渠的安全运营。后续研究中我们将结合水准或GNSS等地面观测方法对形变监测结果进行验证和补充,并融合水文地质等地理客观因素优化风险评估指标,构建更完善的南水北调沿线形变风险评估方案。

志 谢 此次实验所用Sentinel-1A数据由欧洲航天局提供,在此表示衷心感谢。

参考文献(References)

- Ansari H, De Zan F and Bamler R. 2018. Efficient phase estimation for interferogram stacks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(7): 4109-4125 [DOI: 10.1109/tgrs.2018.2826045]
- Berardino P, Fornaro G, Lanari R and Sansosti E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2375-2383 [DOI: 10.1109/tgrs.2002.803792]
- Dong J, Lai S J, Wang N, Wang Y A, Zhang L and Liao M S. 2021. Multi-scale deformation monitoring with Sentinel-1 InSAR analyses along the Middle Route of the South-North Water Diversion Project in China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 100: 102324 [DOI: 10.1016/j.jag.2021.102324]
- Dong J J, Li X, Mei Y and Liu S Y. 2022. D-InSAR monitoring of site stability for surface substation above old mine goaf. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 39(1): 62-71 (董建军, 李昕, 梅媛, 刘士乙. 2022. 老采空区地表变电站场地稳定性的D-InSAR监测. *采矿与安全工程学报*, 39(1): 62-71) [DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2020.0472]
- Du Z Y, Ge L L, Ng A H M, Lian X G, Zhu Q G Z, Horgan F G and Zhang Q. 2021. Analysis of the impact of the South-to-North water diversion project on water balance and land subsidence in Beijing, China between 2007 and 2020. *Journal of Hydrology*, 603: 126990 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.122990]
- Fan H D, Gu W, Qin Y, Xue J Q and Chen B Q. 2014. A model for extracting large deformation mining subsidence using D-InSAR technique and probability integral method. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, 24(4): 1242-1247 [DOI: 10.1016/s1003-6326(14)63185-x]
- Ferretti A, Prati C and Rocca F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20 [DOI: 10.1109/36.898661]
- Jiang J X, Du Y L, Chen Y, Liu G and Yan S Y. 2021. Monitoring and analysis of surface deformation in Peibei mining region based on DS-InSAR technique. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (2): 117-121 (蒋金雄, 杜玉玲, 陈宇, 刘广, 闫世勇. 2021. 利用DS-InSAR技术监测沛北矿区地表形变. *测绘通报*, (2): 117-121) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0056]
- Li Y. 2019. Long Time-Series InSAR Surface Deformation Monitoring with Distributed Scatterers in Mining Area. Xuzhou: China University of Mining and Technology (李毅. 2019. 融合分布式目标的矿区长时序InSAR地表形变监测. 徐州: 中国矿业大学)
- Li Y X. 2016. Cause and activity analysis of the Baizhuang ground fissure for the South-to-North Water Transfer Project. *South-to-North Water Transfers and Water Science Technology*, 14(4): 173-178 (李永新. 2016. 南水北调中线工程白庄地裂缝成因及活动性分析. *南水北调与水利科技*, 14(4): 173-178) [DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.04.029]
- Lu L. 2020. Study on DS-InSAR Method for Monitoring Time-Series Surface Deformation in Mining Area. Xuzhou: China University of Mining and Technology (鹿璐. 2020. 面向矿区地表时序沉降

- 监测的DS-InSAR方法研究. 徐州: 中国矿业大学 [DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2020.000234]
- Ma C, Qu C Y and Meng X J. 2014. Embankment stability of the north Henan section of Middle Route Project (MRP) of South-to-North Water Diversion based on InSAR time series analysis. *Seismology and Geology*, 36(3): 749-762 (马超, 屈春燕, 孟秀军. 2014. 南水北调总干渠中线工程豫北段基础稳定性的InSAR时序分析. *地震地质*, 36(3): 749-762) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2014.03.016]
- Ma L, Wu J, Liu Z Y, Bi Y L, Peng S P and Xue F. 2022. Slope stability analysis of external dump in Hongshaquan Open-pit Coal Mine. *Coal Engineering*, 54(3): 12-16 (马力, 武璟, 刘遵义, 毕银丽, 彭苏萍, 薛飞. 2022. 红沙泉露天煤矿外排土场边坡稳定性研究. *煤炭工程*, 54(3): 12-16) [DOI: 10.11799/ce202203003]
- Osmanoğlu B, Sunar F, Wdowski S and Cabral-Cano E. 2016. Time series analysis of InSAR data: methods and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115: 90-102 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003]
- Shamshiri R, Nahavandchi H, Motagh M and Hooper A. 2018. Efficient ground surface displacement monitoring using Sentinel-1 data: integrating distributed scatterers (DS) identified using two-sample t-test with persistent scatterers (PS). *Remote Sensing*, 10(5): 794 [DOI: 10.3390/rs10050794]
- Tian F. 2020. Application Research of Time Series InSAR Technology in Deformation Monitoring of Central Line Project of South-to-North Water Diversion. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology (田凡. 2020. 时序InSAR技术在南水北调中线形变监测中的应用研究. 西安: 西安科技大学) [DOI: 10.27397/d.cnki.gxaku.2020.000278]
- Wang G J, Xie M W, Qiu C and Esaki T. 2010. Application of D-InSAR technique to landslide monitoring. *Rock and Soil Mechanics*, 31(4): 1337-1344 (王桂杰, 谢谟文, 邱骋, 江崎哲郎. 2010. D-INSAR技术在大范围滑坡监测中的应用. *岩土力学*, 31(4): 1337-1344) [DOI: 10.16285/j.rsm.2010.04.010]
- Wang H J. 2021-07-22(006). A total of 40 billion cubic meters of water has been transferred from the middle route of the South-to-North Water Diversion Project. *CPPCC Daily* (王菡娟. 2021-07-22(006). 南水北调中线累计调水400亿立方米. *人民政协报*) [DOI: 10.28660/n.cnki.nrmzx.2021.005918]
- Wang Y S and Yang Y Y. 2005. South-to-North Water Transfer project of China. *Yangtze River*, 36(7): 2-5 (汪易森, 杨元月. 2005. 中国南水北调工程. *人民长江*, 36(7): 2-5) [DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2005.07.001]
- Xie M W, Wang Z F, Hu M and Huang J H. 2012. The characteristic analysis of D-InSAR data for landslides monitoring in alpine and canyon region. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 4: 18-21, 40 (谢谟文, 王增福, 胡嫚, 黄洁慧. 2012. 高山峡谷区D-InSAR滑坡监测数据特征分析. *测绘通报*, 4: 18-21, 40)
- Xu D B, Feng H and Yan S Y. 2020. Deformation monitoring for structural health of Xiaolangdi Dam with Sentinel-1A based on DS-InSAR. *China Rural Water and Hydropower*, (6): 165-170 (徐东彪, 冯瀚, 闫世勇. 2020. 基于Sentinel-1A影像的小浪底大坝稳定性时序InSAR分析. *中国农村水利水电*, (6): 165-170) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2020.06.030]
- Yang J W, Tan Z X and Deng K Z. 2021. Deformation monitoring and law analysis of railway in mining area based on DS-InSAR. *Coal Engineering*, 53(9): 143-148 (杨嘉威, 谭志祥, 邓喀中. 2021. 基于DS-InSAR的矿区铁路线沉降监测与规律分析. *煤炭工程*, 53(9): 143-148) [DOI: 10.11799/ce202109028]
- Yang L Y, Zhao C Y and Yang C S. 2020. Three-dimensional time series movement analysis of the Cuolangma glacier with PO-SBAS technique. *Progress in Geophysics*, 35(6): 2116-2123 (杨丽叶, 赵超英, 杨成生. 2020. PO-SBAS技术用于错朗玛冰川三维时序运动特征分析. *地球物理学进展*, 35(6): 2116-2123) [DOI: 10.6038/pg2020EE0056]
- Zhang Y G, Tian F, Li Y C and Liu H J. 2021. Application of time series InSAR to deformation monitoring in central line Project of South-to-North Water Transfer. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 38(8): 72-77 (张永光, 田凡, 李迎春, 刘豪杰. 2021. 时序InSAR在南水北调中线形变监测中的应用. *长江科学院院报*, 38(8): 72-77) [DOI: 10.11988/ckyyb.20191501]
- Zhao M, Cai Y J, Guo W, Zhu Y J, Li F and Zhao F L. 2007. Land surface deformation characteristics in Jiaozuo coal mining area on middle route of S-N water transfer. *Yangtze River*, 38(9): 52-54, 71 (赵曼, 蔡耀军, 郭伟, 朱瑛杰, 李锋, 赵风雷. 2007. 南水北调中线焦作煤矿采空区地表变形特征. *人民长江*, 38(9): 52-54, 71) [DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2007.09.025]

Monitoring and risk analysis of surface subsidence in the Jiaozuo Goaf along the middle route of the South-to-North Water Diversion Project based on the DS-InSAR method

ZHANG Ziyang¹, ZHANG Jingkai², ZHANG Haolei¹, DU Yuling¹, YAN Shiyong¹

1. MNR Key Laboratory of Land Environment and Disaster Monitoring, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Henan No.5 Institute of Resources and Environment Investigation, Zhengzhou 450053, China

Abstract: As a national strategic project, the middle route of the South-to-North Water Diversion Project (SNWDP) is important for optimizing water resource allocation and promoting regional coordinated development in China. Unfortunately, the main canal of the middle route traverses a mining area in Jiaozuo. The massive surface subsidence caused by goafs left by coal mining has destroyed surrounding

infrastructure and led to national economic losses. Deformation monitoring of the Jiaozuo section along the middle route of the SNWDP must be performed, and the threat of mining subsidence to the main channel should be assessed.

The land surface of the Jiaozuo Goaf is mostly covered with farmland and bare soil. Thus, obtaining a sufficient number of high coherence measurement points via traditional time series InSAR (TS-InSAR) is difficult. Consequently, TS-InSAR, which integrates PS and DS data (DS-InSAR), was used in this study. The TS-InSAR method benefits from homogeneous identification given its two-sample T-hypotheses and interferometric phase optimization based on an “eigen-decomposition-based maximum likelihood estimator” (EMI). The integration can efficiently improve the gathering of the spatial distribution density of measurement points with the help of a large number of scattered points. Particularly for this research, the spatiotemporal distribution of surface deformation in the Jiaozuo Goaf region from 2019 to 2020 was obtained from 54 Sentinel-1A images. Then, on the basis of the deformation monitoring results, a risk assessment indicator of deformation along the SNWDP that considers deformation and distance factors was developed. The index calculation results indicate that the study area can be divided into four grades according to the threat level of surface deformation to the main channel of the middle route of the SNWDP.

The results further revealed several subsidence basins in the Jiaozuo Goaf that are distributed along the main canal of the middle route of the SNWDP. The maximum subsidence is 180 mm, and the maximum deformation rate is approximately -125 mm/a. The deformation of most subsidence centers has a continuous subsidence trend, but no evidence can prove that the boundaries of the subsidence basins would expand to the main channel of the SNWDP. The results of risk grading based on risk assessment indicators also revealed the presence of no-risk and low-risk areas along the main canal of the SNWDP, accompanied by a small number of medium- to high-risk areas.

Overall, DS-InSAR can obtain sufficient observation points and realize fine deformation monitoring of mining areas within the SNWDP and Jiaozuo. The Jiaozuo section of the middle route of the SNWDP is less affected by mining subsidence, while high-deformation risk areas exist in the northwestern mines in Zhangtun, Baizhuang, and Zhongmacun. High-risk areas need to be continuously monitored to prevent potential subsidence hazards. The spatial distribution of medium- to high-risk areas is in good agreement with the results of the deformation analysis. Therefore, the risk indicator based on deformation and distance factors proposed in this study has good research value and can provide a scientific basis for disaster risk assessment of the SNWDP. Future research may include exploring hydrogeological factors and optimizing risk assessment indicators to improve the accuracy of deformation risk evaluation results under complex geological conditions.

Key words: remote sensing, goaf, DS-InSAR, surface deformation monitoring, middle route of South-North Water Diversion Project, risk indicator

Supported by National Key Research and Development Program (No. 2022YFE0102600); National Natural Science Foundation of China (No. 42004011, 41876226)