

doi: 10.6046/zrzyyg.2021415

引用格式: 虎小强, 杨树文, 闫恒, 等. 基于时序 InSAR 的新疆阿希矿区地表形变监测与分析[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(1): 171-179. (Hu X Q, Yang S W, Yan H, et al. Time-series InSAR-based monitoring and analysis of surface deformation in the Axi mining area, Xinjiang[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(1): 171-179.)

基于时序 InSAR 的新疆阿希矿区地表形变监测与分析

虎小强¹, 杨树文^{1,2,3}, 闫恒¹, 薛庆¹, 张乃心¹

(1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 兰州 730070; 2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 兰州 730070; 3. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 兰州 730070)

摘要: 新疆阿希矿区地理环境复杂, 长期的矿产资源开采致使矿区的地面发生了较为严重的沉降和变形, 造成了采矿生产安全隐患和周边生态环境的破坏。为了进一步研究分析阿希矿区地面沉降时空变化特征和地表形变规律。首先, 利用小基线集合孔径雷达干涉测量 (small baseline subset-interferometric synthetic aperture Radar, SBAS-InSAR) 技术对 2017 年 2 月 9 日—2021 年 4 月 25 日获取的 127 景升轨 Sentinel-1A 影像数据进行沉降计算; 其次, 将 InSAR 沉降监测结果与水准测量结果进行对比验证; 最后, 分析了阿希矿区近 5 a 地面沉降时空变化特征, 并研究了影响矿区地面沉降的驱动因素。结果表明, 在整个监测期间内, 阿希矿区地表形变呈现出整体基本趋于稳定状态、局部沉降较为明显的特征。造成矿区沉降的主要因素为矿产开采、地质构造、降水及露天矿井蓄水等。本研究可为矿区地面沉降监测以及今后地下矿物的合理开采提供科学依据。

关键词: 阿希矿区; SBAS-InSAR; 地面沉降; 时空变化监测; 驱动因素

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-035X(2023)01-0171-09

0 引言

地面沉降是在自然因素和人为因素共同影响下, 导致一定范围内地面高程降低的地质现象, 是一种无法自我恢复的环境和资源损失^[1-3]。新疆阿希地区的高强度矿产开发引发了不同程度的地表形变, 破坏了当地生态环境, 造成潜在的采矿安全隐患。由此, 探索和研究阿希矿区的地面形变特征以及时空变化规律具有重要的现实意义。

近年来, 应用于地表形变监测的方法主要有基于点的水准测量和全球定位系统等^[4], 然而, 这些传统监测手段通常耗时耗力且空间分辨率较低^[3-4]。基于合成孔径雷达数据的干涉测量 (interferometric synthetic aperture Radar, InSAR) 技术发展迅速, 与传统方法相比, 该方法具有效率高、精度高等优点, 已经广泛应用于区域性地表形变监测、滑坡灾害预测及地震形变^[3]。差分雷达干涉测量技术 (differential interferometric synthetic aperture Radar, D-InSAR) 技术可获得精度达毫米级的地表形变信息,

但其精度容易受时空失相干和大气延迟等因素的影响, 且时间分辨率也比较低^[4-7]。时间序列 InSAR 技术有效地克服了时空相干、大气延迟异常以及地形对差分的影响等问题^[8-15]。由此, 许强等^[3]利用时序 InSAR 技术对延安新区地面沉降时空演化进行了研究; Dong 等^[7]使用时间序列 InSAR 技术结合开采沉陷对称特征对煤矿区进行三维位移反演; Yang 等^[8]运用多时相 InSAR 技术对东胜矿区地表形变进行了研究。总结上述研究并结合其他文献可知, 时序 InSAR 技术在矿区地表形变监测中具有广泛的应用前景。因此, 本文利用时序 InSAR 技术对新疆阿希矿区地面沉降进行时空变化监测。

地表形变是新疆阿希矿区严重的次生灾害, 对采矿生产造成严重安全隐患, 致使周边生态环境也发生破坏。但针对新疆阿希矿区地表形变相关研究较少, 未能有效、科学地反映矿区地表形变规律。因此, 为了更好地研究阿希矿区的形变特征以及时空变化规律, 本文选取 Sentinel-1A 升轨雷达影像数据, 采用 SBAS (small baseline subset) - InSAR 技术

收稿日期: 2021-11-30; 修订日期: 2022-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目“西北重点城市彩钢板建筑群与产业园区时空关联关系”(编号: 42161069)和国家自然科学基金项目“基于高分辨率卫星影像的彩钢板建筑与城市空间结构演变关系研究”(编号: 41761082)共同资助。

第一作者: 虎小强 (1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为 InSAR 形变监测。Email: 1938204120@qq.com。

通信作者: 杨树文 (1975-), 男, 博士, 教授, 研究方向为遥感数字图像处理及信息自动提取、灾害遥感。Email: 825198827@qq.com。

获得2017—2021年5 a间新疆阿希矿区的形变信息,分析了地面沉降与开山取金的时空相关性,并对其沉降驱动因素进行分析与探讨,进而为今后阿希金矿有效开采提供科学依据。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

阿希矿区位于新疆维吾尔自治区伊宁县境内,地处西天山西段的吐拉苏火山断陷盆地内^[16],其范围大致分布在E81°36′~81°38′,N44°13′~44°13′,是大型的浅层低温黄金矿^[17]。矿区地质构造发育,以断裂为主,区域地层及其构造线均呈西北方向展布,地形切割强烈^[17]。研究区概况如图1所示。

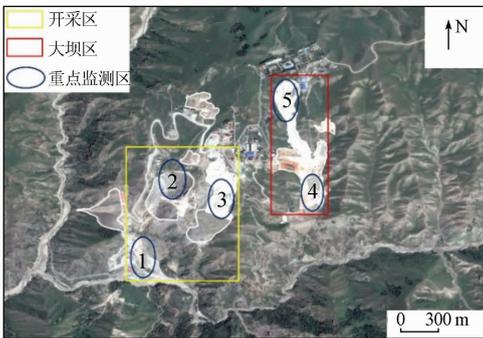


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

1.2 数据源

本研究应用的数据源有 Sentinel-1A 影像数

$$\delta \varphi_j = \varphi(t_B) - \varphi(t_A) \approx \delta \varphi_j^{\text{def}} + \delta \varphi_j^{\text{topo}} + \delta \varphi_j^{\text{atm}} + \delta \varphi_j^{\text{noise}}, \quad (1)$$

式中: $\delta \varphi_j$ 为干涉相位; $\varphi(t_A)$ 和 $\varphi(t_B)$ 分别表示 t_A 和 t_B 时刻的相位; $\delta \varphi_j^{\text{def}}$ 为视线方向的形变相位; $\delta \varphi_j^{\text{topo}}$ 为地形相位; $\delta \varphi_j^{\text{atm}}$ 为大气相位; $\delta \varphi_j^{\text{noise}}$ 为噪声相位。将所得干涉图,通过奇异值分解法(singular value decomposition, SVD)将多个小集合联合起来进行求解,进而获取整个观测期间内的地表时间序列形变信息。

2.2 数据处理及形变计算

利用 ENVI/SARscape 软件对所获取的 127 景 Sentinel-1A 数据进行时间序列处理和形变计算,具体处理流程如图2所示。主要包括以下5个步骤:1)生成连接图和干涉对组合。根据阿希矿区的地形和气候等因素分析,将空间基线阈值设为60%,以防止完全空间失相干;同时,为避免无相干数据对,将时间基线阈值设为300,便于估算低相干性区域,建立新的连接;然后,选择超级主影像并进行处理,生成时空基线(图3)。

据、SRTM DEM(digital elevation model)数据、降水数据、地质数据和 Google Earth 影像等。其中, Sentinel-1A 升轨影像数据用于对矿区地面沉降特征进行研究,其空间分辨率为 $5 \text{ m} \times 20 \text{ m}$, 重访周期为 12 d, 入射角为 39° , 极化方式为 VV^[3]。为了更好地研究与分析地面沉降的时空特性以及沉降机理,选取了2017年2月9日—2021年4月25日的127景升轨 Sentinel-1A 单视复数(single look complex, SLC)影像。并采用空间分辨率为30 m的SRTM DEM数据去除地形相位分量。此外,采用2017年和2020年2期的Google Earth影像对矿区工程建设的空间变化进行解译,用于沉降原因分析。

2 研究方法

2.1 SBAS-InSAR 沉降监测原理

SBAS-InSAR 是一种利用多幅主影像与基于短时空基线准则的 InSAR 时间序列分析方法,该方法在一定程度上可以有效地克服传统 InSAR 技术空间基线过长,导致的时间和空间失相干现象,并能有效地削弱大气延迟的影响,同时也增加了形变监测的时间分辨率^[18]。

沉降监测原理为^[19-25]:利用覆盖同一区域的 $N+1$ 幅 SAR 影像,选一幅影像作为超级主影像进行配准,通过设置恰当的时空基线阈值组成不同的干涉对,生成差分干涉图。则特定像元点在干涉图中的干涉相位可以表示为:

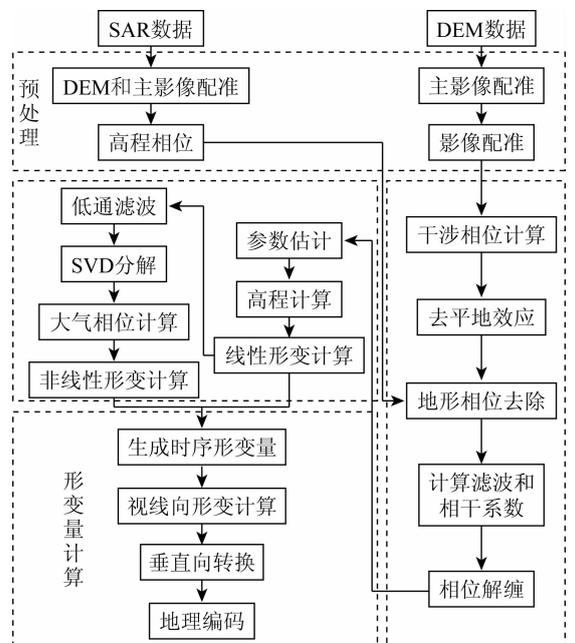


图2 SBAS-InSAR 处理流程

Fig. 2 SBAS-InSAR processing flow

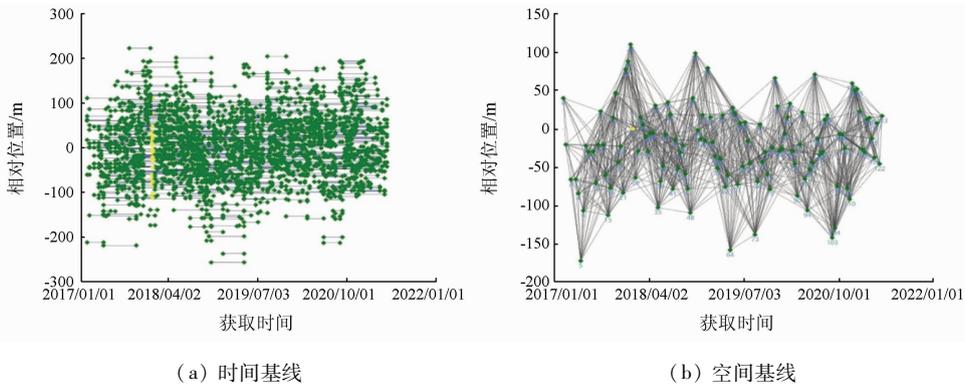


图 3 SBAS - InSAR 时空基线

Fig. 3 SBAS - InSAR spatiotemporal baseline

2) 干涉 workflow 处理。首先利用复数像对共轭相乘得到干涉图,再利用参考 DEM 模拟并剔除其地形相位,采用 Goldstein 算法平滑相干斑噪声,提高干涉条纹清晰度。选择最小费用流 (minimum cost flow, MCF) 算法获得差分干涉序列的解缠相位图,并剔除不理想的干涉像对。

3) SBAS - InSAR 轨道精炼和重去平。选取相位稳定且远离形变区的 35 个地面控制点 (ground control points, GCP), 采用多项式拟合优化方法。达到消除斜坡效应,修正相位偏移,估算以及去除残余恒定相位的目的。

4) SBAS - InSAR 反演。先通过建立线性模型计算出所有像对的残余地形和地表形变速率,利用 SVD 法解算相关参数,得出干涉像对的平均形变速率和高差。然后再通过大气滤波估算、去除大气相位和地形残余相位,最终获得时间序列位移图。

5) 地理编码。将基于 SBAS 坐标系的反演结果转化为地理坐标,并显示地理坐标系下视线向形变和垂直向形变。

均形变速率最小区域分布 N5 点附近。监测区边缘地带在监测时间内基本处于稳定状态,平均形变速率在 $-2 \sim 1 \text{ mm/a}$ 之间。

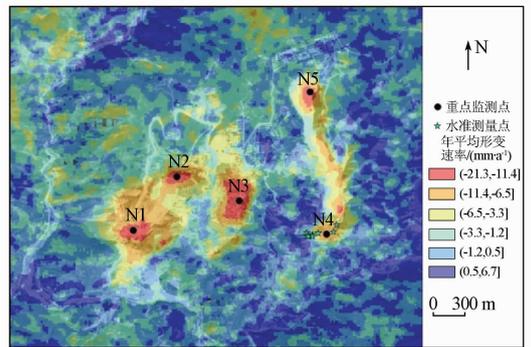


图 4 2017—2021 年新疆阿希矿区地表年平均形变速率

Fig. 4 Average annual surface deformation rate of Axi mining area in Xinjiang from 2017 to 2021

表 1 2017—2021 年监测点平均形变速率

Tab. 1 Average deformation rate of monitoring sites from 2017 to 2021

($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)

重点监测点	平均形变速率
N1	-14
N2	-17
N3	-21
N4	-15
N5	-10

3 地面沉降时空特征及成因分析

3.1 地面沉降空间分布特征

利用 SBAS - InSAR 技术对 2017 年 2 月 9 日—2021 年 4 月 25 日期间获取的覆盖新疆阿希矿区的 Sentinel - 1A 升轨影像数据进行数据处理,得到了新疆阿希矿区长时间序列的地表形变信息 (图 4), 其中,负速率值和正速率值分别表示地面沉降和抬升。通过对图 4 分析发现,在监测时间内,阿希矿区地面平均形变速率范围主要分布在 $-15 \sim -5 \text{ mm/a}$ 之间,最大平均形变速率可达 -21 mm/a ; 阿希矿区地面沉降变形主要分布在重点监测点 N1 ~ N5 (图 4 中小圆点) 附近。各监测点的平均形变速率如表 1 所示,平均形变速率最大区域分布在 N3 点附近,平

3.2 InSAR 监测精度验证

为验证 SBAS - InSAR 技术监测结果的可靠性与一致性,选用了研究区内 8 个地面水准测量基准点 (图 4 中小五星),以每个基准点为中心特定半径 (选取半径为 10 m) 内像元的平均形变速率作为对应 InSAR 测量结果。

研究中将 2019 年 3 月和 2020 年 3 月实测水准数据与 Sentinel - 1A 数据获取的沉降速率进行对比分析,总体上呈现了良好的一致性,其对比结果如表 2 所示。对比发现,二者之间存在一定的差异。为此,计算了每个水准点的 InSAR 和水准测量之间差

异的均方根误差 $RMSE$, 并计算了 2 个测量结果之间的最大和最小误差。 $RMSE$ 为 0.75 mm/a , 最大和最小误差分别为 3.3 mm/a 和 1.0 mm/a 。

表 2 SBAS-InSAR 监测结果精度验证
Tab.2 Accuracy verification of SBAS-InSAR monitoring results

序号	InSAR 形变量	水准形变量	差值
NJ01	-2.5	-1.2	1.3
NJ02	-3.7	-1.9	1.8
NJ03	-3.1	-2.1	1.0
NJ04	-6.6	-4.3	2.3
NJ05	-13.7	-11.8	1.9
NJ06	-4.8	-3.4	1.4
NJ07	-9.1	-7.9	1.2
NJ08	-15.4	-12.1	3.3

进一步分析表明,二者之间的差异主要归因于水准测量和 InSAR 观测之间的位置和采集时间点并非完全吻合,及水准测量时外界条件等因素对其精度均有一定的影响,这种误差对 InSAR 监测结果的使用影响相对较小。因此,可以利用 InSAR 监测

结果来分析矿区地面沉降时空演化特征及地面沉降与各驱动因素之间的关系。

3.3 地面沉降时空特征分析

3.3.1 地面沉降空间演化特征分析

以 2017 年 2 月 9 日为起始日期,2021 年 4 月 25 日为截止日期,以 6 个月为时间段,选取了研究区的 9 幅 Sentinel-1A 升轨影像数据来研究矿区地面沉降的空间演化过程(图 5)。通过图 5 分析发现,2017 年 2 月—2018 年 2 月,矿区地面沉降分布面积明显增加,累积形变量范围在 $-25 \sim -8 \text{ mm}$ 的区域增加尤为显著;2018 年 8 月—2019 年 8 月,矿区地面沉降分布总面积持续增加,且局部区域(红色图斑)沉降面积变化更加迅速,累积沉降量增加明显,其中重点监测点 N1~N4 面积变化最为明显;2020 年 2 月—2021 年 2 月,研究区内累积形变量为 $-15 \sim -8 \text{ mm}$ (黄色)之间的区域有所减小;在局部区域,累积形变量为 $-20 \sim -9 \text{ mm}$ (红色)之间的区域沉降面积分布扩大,且沉降速率变化更加明显。

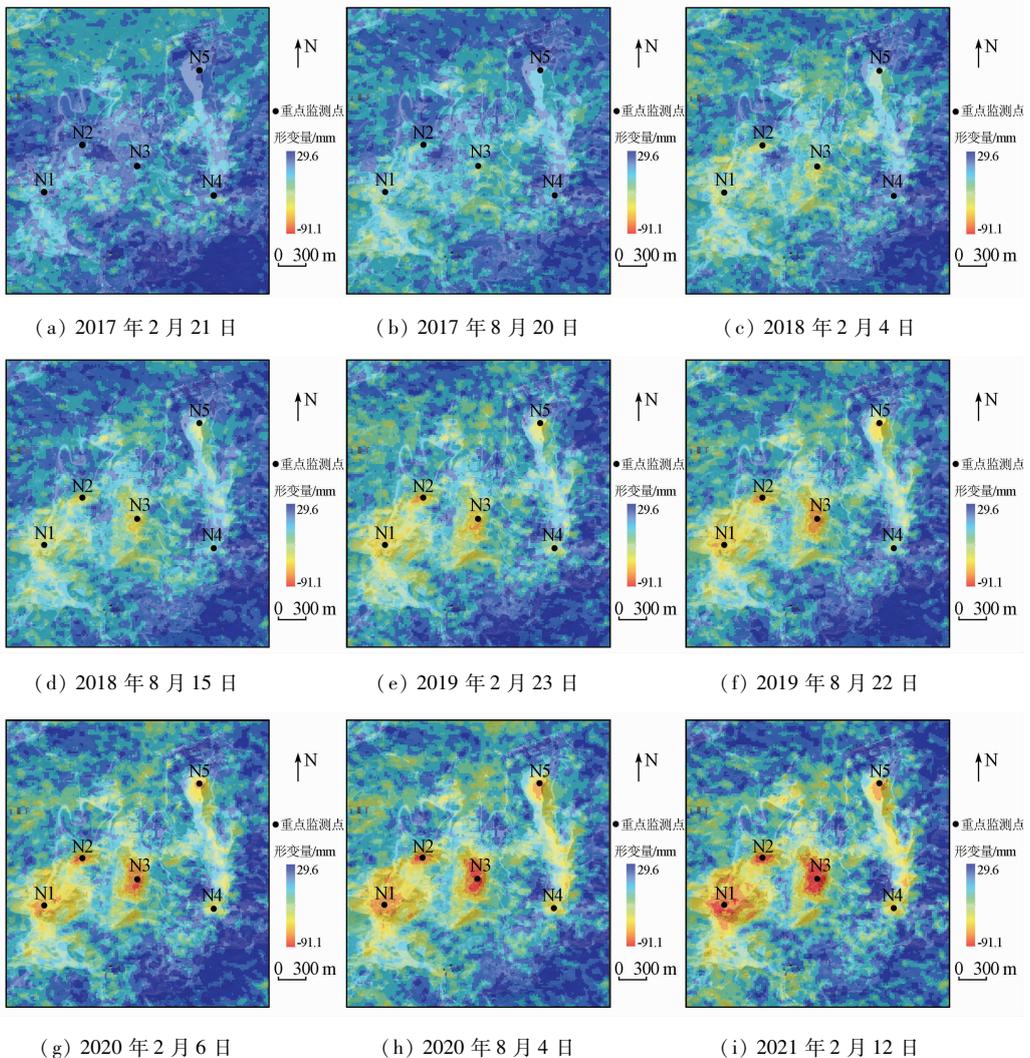


图 5 新疆阿希矿区地面沉降空间演化过程

Fig.5 Spatial evolution process of land subsidence in Axi mining area, Xinjiang

从整个空间演化过程可知,2017—2021 年研究区内地面沉降分布总面积呈现出先增加后减少现象;但在局部沉降分布面积持续增加,沉降速率也大幅上升,最大累积形变量至 -90 mm 左右。据此表明,沉降严重的每个区域都位于中度沉降区域内,说明严重沉降只是一种局部现象,人为采矿是致使局部地面严重沉降的主要因素。

3.3.2 地面沉降时间演化特征

为了更好地研究新疆阿希矿区地面沉降时间演化特征,将对图 4 中的 5 个重点监测点进行时序形变信息分析,得到了 2017—2021 年间矿区累积形变信息随时间变化折线图,如图 6 所示。分析可知,在监测时间内,各监测点均以不同的沉降速率呈现出逐年增加的趋势,其中,N3 在监测时段内形变速率变化最大,沉降最为严重,累积形变量约为 -87 mm ; N5 在监测时段内沉降变化速率最小,其累积形变量为约为 -37 mm ,此区域沉降速率缓慢,沉降范围基本趋于稳定。

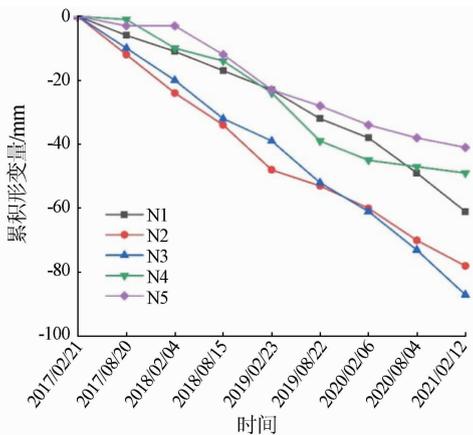


图 6 重点监测点地表累积形变折线图
Fig. 6 Broken line diagram of cumulative surface deformation at important monitoring points

此外,利用线性拟合模型对各个重点监测点的时序形变信息进行拟合,结果如图 7 所示。由此分析可知,在 2017—2021 年间,地面累积形变量随

间的增加而增加,且基本呈线性关系。因此推测,在未来较长的时间段内,地表形变尚未达到稳定状态,沉降将依然继续发生,此后可能会继续加剧。

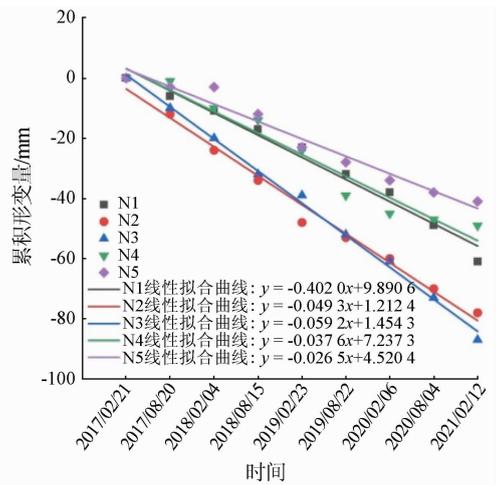


图 7 重点监测点地表累积形变拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of cumulative surface deformation at important monitoring points

3.4 地面沉降驱动因素分析

近年来,随着阿希矿区矿产资源储量进一步探明以及黄金价格不断攀升,阿希矿区生产规模逐年扩大,致使矿区地表发生了严重的形变。此外,地质构造、降水补给以及露天矿井蓄水等因素都不同程度影响着矿区的地表形变,因此仍需进一步研究矿区地面沉降与各种驱动因素之间的关系。

3.4.1 采矿工程

在监测时间内,选取覆盖矿区的 2 期历史(2017 年 7 月 15 日和 2020 年 7 月 3 日) Google Earth 光学影像对矿区工程建设过程中的空间变化进行解译,其可以基本反映出矿区空间演化过程,并将其与 2017—2021 年累积形变量图进行叠加(图 8)。由图 8(a)分析可知,从 2017—2020 年矿区工程区域面积明显增加,各重点监测区域也伴随着不同程度的增加。根据图 8(b)发现,该地区形变最大

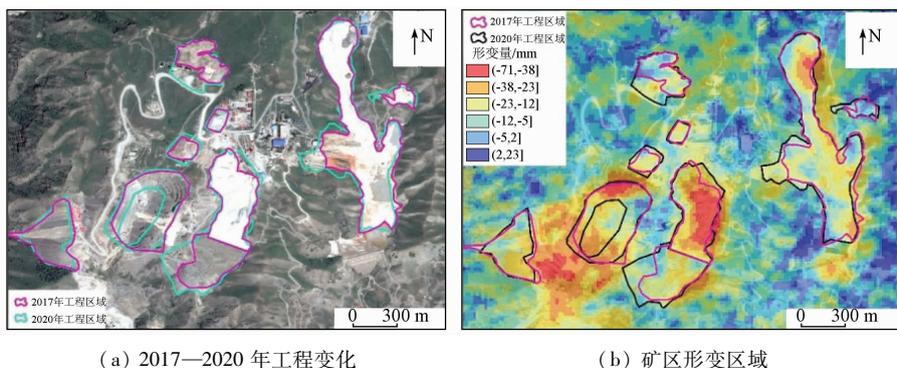


图 8 研究区工程演化与形变关系
Fig. 8 Relationship between engineering evolution and deformation in the study area

的区域在空间分布上与重点监测区域吻合,且随着采矿工程的进行,矿区沉降面积不断扩大,沉降速率持续加快。因此,在 2017—2021 年,采矿工程可能是影响并加剧新疆阿希矿区地面沉降速率的主要因素。

3.4.2 地质构造

相关研究表明,断层构造、地层岩性特征对地面沉降的产生和发展有一定的影响^[26]。因此,本研究将阿希矿区地质图与年平均形变速率图进行叠置分析(图 9)。阿希金矿床南北向展布的由 3 个矿化带构成,构造以断裂为主,褶皱不发育^[27-30]。矿带总长为 1 280 m,西缘矿化带是金矿床最主要的成矿带,是矿山主要开发对象。主矿体受控于弧形断裂 F2,总体呈向南西凸出的弧形带状分布;矿体东南部被 F4 断裂带强烈切割,发生明显断层现象。矿区发育的断裂构造和复杂岩性组合。在成矿前期 F2 断裂为长期活动的张性断裂,火山活动末期岩浆房收缩导致火山口下陷,主要是来自火山活动晚期的次火山岩浆和期后的火山气液依次沿该断裂裂隙上侵瀑裂围岩、温度转高的热液使围岩发生硅化、黄铁绢英岩化等蚀变作用,然后在区域构造应力作用下,该断裂再度张开,深部含矿热液再次沿蚀变围岩裂隙贯入最终结束矿化作用。随着矿物资源的开发,受 F2 断层控制,上下盘未发现明显形变。F2 断裂既是导矿构造,又是控矿构造。此外,由于长期的大气降水渗透,成矿物质的火山岩对基底火山岩进行改造,火山下部受热上升。上述过程持续进行形成了地下热液的对流循环,上升的溶液侵蚀了导矿构造岩,使得断裂节理裂隙向外移动,进而使得矿体中部区域的地表形变加剧。由此,通过上述分析表明,地质构造是新疆阿希矿区地面沉降的控制性因素。

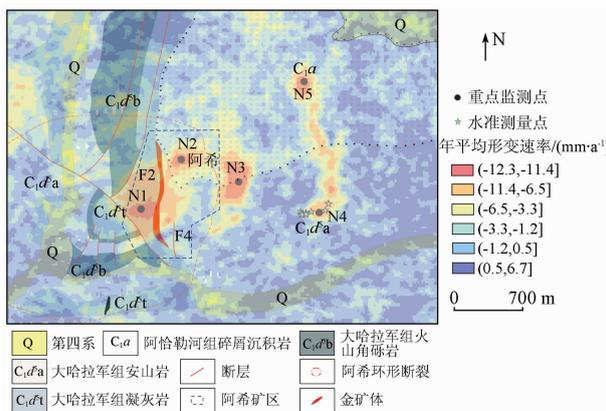


图 9 阿希金矿矿区地质构造与地面沉降关系^[28-29]

Fig. 9 Relationship between geological structure and land subsidence in Axi gold mining area

3.4.3 降水

据相关文献分析表明区域降水是诱发沉降的重要因素之一^[26]。因此,为了分析降水量与地面形变之间的关系,分别选取伊宁县 2019 年的降水数据与 2019 年阿希矿区 4 个季节的平均形变速率数据进行研究。2019 年的地面形变速率可通过年末和年初相邻日期的地面形变累积结果进行相减得到,每个季节的形变量除以时间得到其平均形变速率。通过研究分析 2019 年降水可知,伊宁县降水主要集中在夏季(6—8 月),春季(3—5 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12—2 月)降水量相对较少;将矿区夏季(6—8 月)的地面形变速率与春季、秋季、冬季进行对比。由表 3 可知,冬季的地面形变速率最大,夏季和秋季次之,春季的平均地面形变速率最小。

表 3 2019 年各季节形变速率

Tab. 3 Seasonal deformation rates in 2019 (mm · a⁻¹)

季节	春季	夏季	秋季	冬季
形变速率	-1.63	-2.87	-1.98	-3.06

此外,为了进一步分析地面沉降与月降水量的关系,本文针对 5 个重点监测点的地面累积形变量与月降水量进行比较分析,结果如图 10 所示。在降水量较多的范围内,重点监测点的形变量增加缓慢,反之在降水量减小的时间范围内,重点监测点的形变量增加显著,说明降水在一定程度上减缓了矿区地面沉降速率。

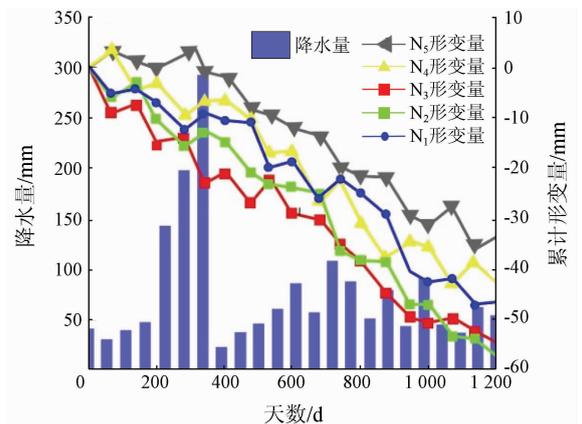


图 10 地面沉降与降水关系

Fig. 10 Relationship between land subsidence and precipitation

由上述地面沉降与降水的关系可知,降水在一定程度上减缓了矿区地面沉降速率。但在某些特殊区域(露天矿坑与其周围地区),降水却对地面沉降速率有着不同的影响,如图 11 所示。一是采矿过程中产生的碎石、沙砾、泥土形成的沙土推,在多雨季节,当有大量的雨水注入时,软化致使其地面下沉,造成地面沉降。另外,露天矿井蓄水也是引起矿区

地表形变的原因之一。如图 11(a)和(c)可知,2017—2020年工程区域面积、体积基本没有发生明显变化。但由图 11(b)和(d)可知,在监测时间范围内工程区域发生了明显的地面沉降现象。由此,

造成上述现象的过程可能是大量积水浸泡使矿井底层下陷,周围岩壁滑落,致使矿井周围地面发生塌陷,导致地面沉降。说明在某些特殊区域降水加速了矿区地面沉降速率。

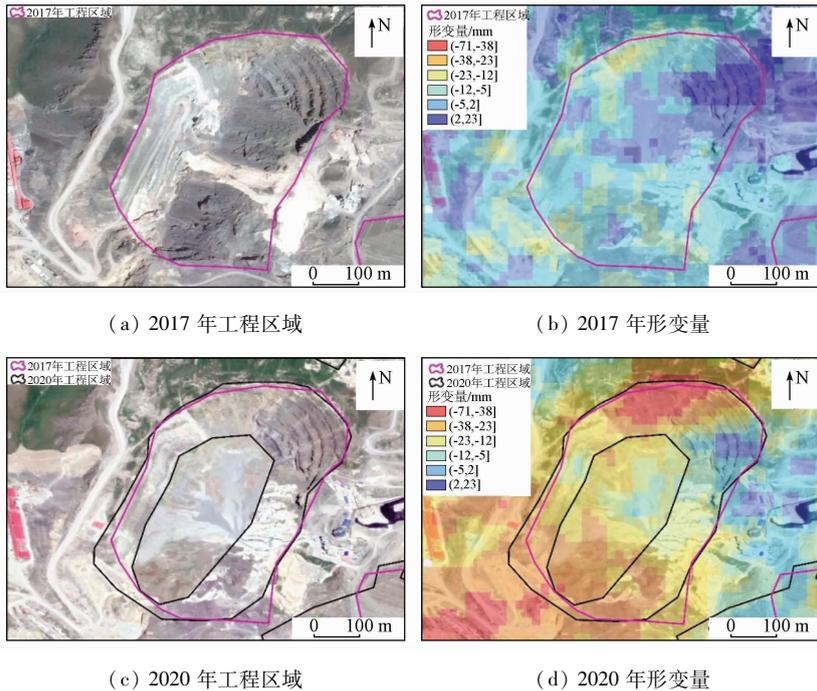


图 11 矿井蓄水与沉降关系

Fig. 11 Relationship between mine water storage and settlement

4 结论

采用 SABS - InSAR 技术对 2017—2021 年覆盖研究区的 127 景 Sentinel - 1A 升轨影像数据进行地面沉降计算,获得了新疆阿希矿区地表平均形变速率分布,分析了矿区地面沉降的时空演化特性以及沉降驱动因素,得到的主要结论如下:

1) 将 InSAR 监测结果与水准测量结果进行交叉验证,其结果基本一致,表明监测结果可靠性。

2) 在观测期间,整个研究区基本处于稳定状态,但在局部区域沉降显著,其年均最大形变速率大约可达 -21 mm/a 。

3) 由时序形变信息拟合结果可知,各监测点沉降量随时间的增加而增加,且基本呈线性关系。可以预测,研究区局部地面沉降将在未来一段时间内将持续增加,沉降漏斗将不断变大。

4) 通过对阿希矿区地面沉降驱动因素分析可知,采矿工程是引起矿区地面沉降的主要原因。此外,地质构造是阿希矿区地面沉降的控制性因素;降水在一定程度上减缓了矿区地面沉降速率,但在某些特殊区降水却加速了矿区地面沉降速率。

参考文献 (References):

- [1] 李毅,蒋金雄,杜玉玲,等. 融合分布式目标的矿区采动地表时序 InSAR 监测[J]. 中国矿业大学学报,2020,49(6):1199-1206,1232.
Li Y, Jiang J X, Du Y L, et al. Mining surface time series InSAR monitoring of mining area integrating distributed targets[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2020, 49(6): 1199-1206, 1232.
- [2] 徐郡,胡晋山,康建荣,等. 基于 SBAS - InSAR 的矿区村庄地面沉降监测与分析[J]. 金属矿山,2019(10):74-80.
Xu J, Hu J S, Kang J R, et al. Monitoring and analysis of land subsidence of mining villages based on SBAS - InSAR [J]. Metal Mines, 2019(10): 74-80.
- [3] 许强,蒲川豪,赵宽耀,等. 延安新区地面沉降时空演化特征时序 InSAR 监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(7): 957-969.
Xu Q, Pu C H, Zhao K Y, et al. Temporal InSAR monitoring and analysis of temporal and spatial evolution characteristics of land subsidence in Yan'an new area[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2021, 46(7): 957-969.
- [4] Shi M, Gong H L, Gao M L, et al. Recent ground subsidence in the North China Plain, China, revealed by Sentinel - 1A datasets[J]. Remote Sensing, 2020, 12(21): 2579.
- [5] 夏元平,陈志轩,张毅. 南昌市地面沉降 InSAR 监测及影响因素分析[J]. 测绘科学, 2020, 45(11): 115-122, 129.
Xia Y P, Chen Z X, Zhang Y. InSAR monitoring and impact factor analysis of land subsidence in Nanchang[J]. Surveying and Map-

- ping Science, 2020, 45(11): 115 - 122, 129.
- [6] 袁悦, 贾丽云, 张绪教, 等. 基于 SBAS - InSAR 技术的海口地区地面沉降监测及机理分析[J]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(5): 56 - 64.
- Yuan Y, Jia L Y, Zhang X J, et al. Monitoring and mechanism analysis of land subsidence in Haikou area based on SBAS - InSAR technology[J]. Geography and Geographic Information Science, 2020, 36(5): 56 - 64.
- [7] Dong L K, Wang C, Tang Y X, et al. Time series InSAR three - dimensional displacement inversion model of coal mining areas based on symmetrical features of mining subsidence[J]. Remote Sensing, 2021, 13(11): 2143.
- [8] Yang Q, Chang Z Q, Wang Y Q, et al. Ground deformation of Dongsheng mining area revealed by multi - temporal InSAR[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021, 675(1): 012029.
- [9] Vassileva M, AlHalbouni D, Motagh M, et al. A decade - long silent ground subsidence hazard culminating in a metropolitan disaster in Maceió, Brazil[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 1 - 13.
- [10] 王辉, 曾琪明, 焦健, 等. 结合序贯平差方法监测地表形变的 InSAR 时序分析技术[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 57(2): 241 - 249.
- Wang H, Zeng Q M, Jiao J, et al. InSAR time series analysis technology for monitoring surface deformation combined with sequential adjustment method[J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 2021, 57(2): 241 - 249.
- [11] 魏聪敏, 葛伟鹏, 邵延秀, 等. 利用 Sentinel - 1A 合成孔径雷达干涉时间序列监测陇东地区地面沉降变形[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(4): 864 - 872.
- Wei C M, Ge W P, Shao Y X, et al. Monitoring land subsidence and deformation in Longdong area using Sentinel - 1A synthetic aperture Radar interferometric time series[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(4): 864 - 872.
- [12] 王海艳, 冯光财, 苗露, 等. InSAR 视角下准噶尔盆地农业灌溉区地表形变特征和演化规律[J]. 遥感学报, 2020, 24(10): 1233 - 1242.
- Wang H Y, Feng G C, Miao L, et al. Surface deformation characteristics and evolution law of agricultural irrigation area in Junggar Basin from the perspective of InSAR[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(10): 1233 - 1242.
- [13] Xu J M, Zhu W B, Xu J L, et al. High - intensity longwall mining - induced ground subsidence in Shendong coalfield, China[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 141: 104730.
- [14] 丁朋朋, 贾超, 韩瑶, 等. 时序 InSAR 技术的淮北平原地面沉降分析[J]. 测绘科学, 2021, 46(8): 135 - 140.
- Ding P P, Jia C, Han Y, et al. Land subsidence analysis of Weibei plain using time series InSAR technology[J]. Surveying and Mapping Science, 2021, 46(8): 135 - 140.
- [15] 施显健, 任超, 周吕, 等. InSAR 填海区地铁沿线地表沉降反演分析[J]. 测绘科学, 2021, 46(2): 146 - 151, 164.
- Shi X J, Ren C, Zhou L, et al. Inversion analysis of surface subsidence along subway in InSAR reclamation area[J]. Surveying and Mapping Science, 2021, 46(2): 146 - 151, 164.
- [16] 任欣, 易加强. 新疆伊宁县地质灾害特征及其防治[J]. 西部探矿工程, 2014, 26(7): 101 - 103.
- Ren X, Yi J Q. Characteristics and prevention of geological disasters in Yining County, Xinjiang[J]. Western Exploration Engineering, 2014, 26(7): 101 - 103.
- [17] 王宝刚, 张晓斌, 张铭. 新疆阿希勒金矿床地质特征及找矿标志[J]. 陕西地质, 2018, 36(1): 20 - 25.
- Wang B G, Zhang X B, Zhang M. Geological characteristics and prospecting criteria of Axile gold deposit in Xinjiang[J]. Shanxi Geology, 2018, 36(1): 20 - 25.
- [18] 胡乐银, 张景发, 商晓青. SBAS - InSAR 技术原理及其在地壳形变监测中的应用[J]. 地壳构造与地壳应力文集, 2010(1): 82 - 89.
- Hu L Y, Zhang J F, Shang X Q. Principle of SBAS - InSAR technology and its application in crustal deformation monitoring[J]. Collected Works of Crustal Structure and Crustal Stress, 2010(1): 82 - 89.
- [19] 李珊珊, 李志伟, 胡俊, 等. SBAS - InSAR 技术监测青藏高原季节性冻土形变[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1476 - 1486.
- Li S S, Li Z W, Hu J, et al. Monitoring seasonal frozen soil deformation in Qinghai - Tibet Plateau by SBAS - InSAR technology[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1476 - 1486.
- [20] 董少春, 种亚辉, 胡欢, 等. 基于时序 InSAR 的常州市 2015 - 2018 年地面沉降监测[J]. 南京大学学报(自然科学), 2019, 55(3): 370 - 380.
- Dong S C, Zhong Y H, Hu H, et al. Land subsidence monitoring in Changzhou from 2015 to 2018 based on time series InSAR[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2019, 55(3): 370 - 380.
- [21] 曹发伟, 廖维谷. SBAS 技术在矿区地面沉降监测中的应用[J]. 测绘通报, 2021(3): 156 - 158, 163.
- Cao F W, Liao W G. Application of SBAS technology in land subsidence monitoring in mining area[J]. Surveying and Mapping Bulletin, 2021(3): 156 - 158, 163.
- [22] Amani M, Poncos V, Brisco B, et al. InSAR coherence analysis for wetlands in Alberta, Canada using time - series Sentinel - 1 data[J]. Remote Sensing, 2021, 13(16): 3315.
- [23] Gong C G, Lei S G, Bian Z F, et al. Using time series InSAR to assess the deformation activity of open - pit mine dump site in severe cold area[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(11): 3717 - 3732.
- [24] Liu J H, Hu J, Bürgmann R, et al. A strain - model based InSAR time series method and its application to the Geysers Geothermal field, California[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2021, 126(8): e2021JB021939.
- [25] 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.
- [26] 张扬. 武汉市地面沉降时空格局、驱动因子及水文效应研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- Zhang Y. Study on temporal and spatial pattern, driving factors and

- hydrological effects of land subsidence in Wuhan [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [27] 贺小平. 阿希金矿床地质特征及成因探讨[J]. 新疆有色金属, 2001(4):1-4.
He X P. Geological characteristics and genesis of Axi gold deposit [J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2001(4):1-4.
- [28] 魏佳林,曹新志,王庆峰,等. 新疆阿希金矿床黄铁矿标型特征及其地质意义[J]. 地质科技情报, 2011, 30(5):89-96.
Wei J L, Cao X Z, Wang Q F, et al. Typomorphic characteristics and geological significance of pyrite in Axi gold deposit, Xinjiang [J]. Geoscience and Technology Information, 2011, 30(5):89-96.
- [29] 彭义伟,顾雪祥,章永梅,等. 新疆阿希与塔吾尔别克金矿床的成因联系:来自流体包裹体、S-Pb 同位素和黄铁矿热电性的证据[J]. 地质学报, 2020, 94(10):2919-2945.
Peng Y W, Gu X X, Zhang Y M, et al. Geochemical characteristics and prospecting potential of Xilaokou gold deposit, Shandong Province [J]. Acta Geological Sinica, 2020, 94(10):2919-2945.
- [30] 李志忠. 浅谈新疆阿希金矿床地质特征及成矿机理[J]. 新疆有色金属, 2006(3):6-7.
Li Z Z. Geological characteristics and metallogenic mechanism of Axi gold deposit in Xinjiang [J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2006(3):6-7.

Time – series InSAR – based monitoring and analysis of surface deformation in the Axi mining area, Xinjiang

HU Xiaoqiang¹, YANG Shuwen^{1,2,3}, YAN Heng¹, XUE Qing¹, ZHANG Naixin¹

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. National – Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The Axi mining area in Xinjiang has a complex geographical environment. The long – term exploitation of mineral resources has caused severe ground subsidence and deformation in the mining area, as well as safety hazards of mining and production and the destruction of the surrounding ecological environment. This study aims to further investigate and analyze the spatial – temporal variation characteristics of the ground subsidence and the patterns of surface deformation in the Axi mining area. To this end, this study first calculated the land subsidence using the small baseline subset – interferometric synthetic aperture Radar (SBAS – InSAR) technique based on the 127 scenes descending Sentinel – 1A images acquired from February 9, 2017 to April 25, 2021. Then, it compared the subsidence monitoring results obtained using the InSAR technique with the leveling results for verification. Finally, this study analyzed the spatial – temporal variation characteristics of land subsidence in the Axi mining area in recent five years and investigated the driving factors for the land subsidence. The results show that the surface deformation of the Axi mining area showed a roughly stable trend and significant local subsidence throughout the monitoring period. The main factors affecting the ground subsidence included mineral exploitation, geological structure, precipitation, and the impoundment of open – pit mines. This study will provide a scientific basis for ground subsidence monitoring and the future proper exploitation of underground minerals in the Axi mining area.

Keywords: Axi mining area; SBAS – InSAR; land subsidence; spatial – temporal change monitoring; driving factor

(责任编辑: 陈 理)