

doi: 10.6046/zrzyg.2021107

引用格式: 杨旺,何毅,张立峰,等. 甘肃金川矿区地表三维形变 InSAR 监测[J]. 自然资源遥感,2022,34(1):177-188. (Yang W, He Y, Zhang L F, et al. InSAR monitoring of 3D surface deformation in Jinchuan mining area, Gansu Province[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(1): 177-188.)

甘肃金川矿区地表三维形变 InSAR 监测

杨旺^{1,2,3}, 何毅^{1,2,3}, 张立峰^{1,2,3}, 王文辉^{1,2,3}, 陈有东^{1,2,3}, 陈毅^{1,2,3}

(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: 金川矿区是我国最大的镍矿生产基地, 2018 年提出复采计划以来, 对该矿区地表形变的监测还是空白。该文基于 3 个轨道(升轨 128、降轨 33 和 135)的 Sentinel-1A 数据, 利用小基线集雷达干涉 (small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR) 和结合先验条件的最小二乘法迭代法获得金川矿区 2018—2020 年的地表三维分量形变速率和时序形变量, 并使用水准实测数据对垂直向累计形变值进行验证。结果表明: 金川矿区在 3 个开采区(龙首矿、西二矿、东三矿)形成了 3 个大面积的形变区域, 主要表现为地表沉降, 其中最大垂直向形变量和形变速率发生在西二矿区, 分别为 -408.9 mm 和 -162.8 mm/a。龙首矿区西南和东北边坡向矿脉处收缩, 西二矿区和东三矿区形成的形变区域位移方向相似, 均为沉降漏斗东西两侧向矿脉处收缩。金川矿区地表形变与人机采动、地质断层以及岩性构造紧密相关, 其中人机采动是地表形变的主要原因, 断层和岩性构造是地表形变的控制性因素。研究结果为金川矿区安全生产和开采规划提供理论支撑。

关键词: 形变监测; SBAS-InSAR; 三维分解; 金川矿区

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)01-0177-12

0 引言

矿产资源在经济发展中起到了极大的推动作用, 其中, 矿业占了国内生产总值的 5.5%, 矿产资源的开发利用已成为助推中国经济发展的重要动力^[1]。但是, 矿产资源的大规模开发不可避免地导致地表形变、塌陷和其他潜在的灾害隐患。中国地质环境监测院调查结果显示, 2015 年末, 中国矿山因地下开采形成的采空区体积达到 12.8 亿 m³, 引发了矿区坍塌、塌陷等多种地质灾害, 造成大量的财产损失和人员伤亡^[2]。因此, 有必要监测矿区地表形变, 并进行多维分析。

目前, 已有众多学者利用 GPS 和水准测量等方式对矿区的地表形变进行了监测^[3-5], 但这些方法存在监测范围小、效率低、成本高和监测点密度低的缺点^[6]。合成孔径雷达干涉测量 (interferometric synthetic aperture Radar, InSAR) 是一种利用相位差

来获取地表形变信息的高精度测量技术^[7], 该方法监测点的密度高、范围大且效率高^[8]。诸多学者的研究表明, InSAR 技术是监测矿区地表形变的有效手段^[9-12], 例如 Li 等^[13]使用 TS-InSAR (time series InSAR) 技术结合建筑物破坏水平经验模型对淮南矿区的居民住宅进行了稳定性评价; Ma 等^[14]利用 SBAS-InSAR (small baseline subset InSAR) 技术对神东煤田的开采形变状况进行了调查和分析。总结上述研究并结合文献综述获知, 雷达数据的合理选择对矿区地表形变的监测至关重要。目前主流的雷达卫星有 C 波段的 Sentinel-1 和 GF-3, L 波段的 ALOS, X 波段的 TerraSAR-X, COSMO-SkyMed 和 TanDEM-X 等。由于 Sentinel-1A 数据开放, 且具备影像幅宽大、重返周期短、成像质量高等优势, 在矿区地表形变监测中得到了广泛应用^[15-16]。然而, 常规 InSAR 技术只能获取视线向 (line-of-sight, LOS) 的形变, 联合多个轨道模式的影像不仅可以求解地表的三维形变, 而且可以缓解由雷达侧视引起

收稿日期: 2021-04-13; 修订日期: 2021-09-22

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目“联合 InSAR 与地基测量的兰州市主城区边坡形变监测研究”(编号: 2019M660092XB) 和甘肃省青年科学基金项目“基于多轨 InSAR 技术的城市地面沉降与土地利用演变关系——以兰州新区为例”(编号: 20JR10RA272) 共同资助。

第一作者: 杨旺 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 InSAR 技术应用。Email: 947258095@qq.com。

通信作者: 何毅 (1987-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为遥感地表监测研究。Email: heyi8738@163.com。

的透视收缩、叠掩和阴影^[17]。

金川矿区是我国最大的镍矿开采基地之一,其中龙首矿作为金川镍矿的主力矿山,由于连续开采,2016 年出现闭环形裂缝,就此停止采矿。2018 年首次采用无底柱分段崩落法继续开采,该方法具有机械化程度高、开采强度大以及采矿成本相对较低等特点,但引起的地表形变量级较大^[18-19]。地表形变是龙首矿严重的次生灾害,对矿山安全生产活动造成了巨大威胁。因此,有必要探究复采以来龙首矿区地表形变的多维时空特征。基于此,丁宁等^[20]利用 SBAS-InSAR 技术对龙首矿露天矿坑 2009—2011 年和 2015—2016 年的地表形变进行了监测,分析了三维形变特征,但该研究存在监测时段不连续以及最新研究资料欠缺的疏漏,并缺乏对金川矿区整体形变的监测分析;李强^[18]联合 SBAS-InSAR、无人机倾斜摄影测量和水准测量对龙首矿工业化试验区的地表形变特征进行了研究。仍存在监测范围小、数据一致性差、形变机理揭示不够精细的缺陷^[20]。因此,本文基于升降轨模式下 3 个轨道(升轨 128、降轨 33 和 135)的 Sentinel-1A 数据,利用 SBAS-InSAR 技术并结合先验条件的最小二乘迭代法,获取

了金川矿区管辖范围内所有生产区 2018—2020 年间的地表三维形变时空特征,并就其形变机理展开了全面剖析。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

金川矿区位于龙首山断裂带,北接阿拉善台块,南邻北祁连山缝合带^[20](图 1)。该矿是金昌市最早发现并开采利用的老矿山^[21],拥有我国最大的镍储蓄量,也是我国铂金属的主要产地。该矿体呈 NW-SE 走向分布,长约 6 000 m,宽约 300 m,中间部分厚度约 1 000 m^[22]。矿区被一系列 SW-NE 走向的冲断层切割,将侵入矿体分成若干段,甘肃省地质调查院将其划分为 I、II、III、IV 矿区^[23],其中 I 和 III 矿区由金川公司龙首矿开采和管理,II 矿区由西二矿开采和管理,IV 矿区由东三矿开采和管理^[19](图 1(b))。金川矿区土地覆盖以沙化土地为主,包含砂、黏土和砾石等,植被覆盖率较低,后向散射强度较高,开采区地形起伏程度相对较小,适用 InSAR 进行地表形变监测。

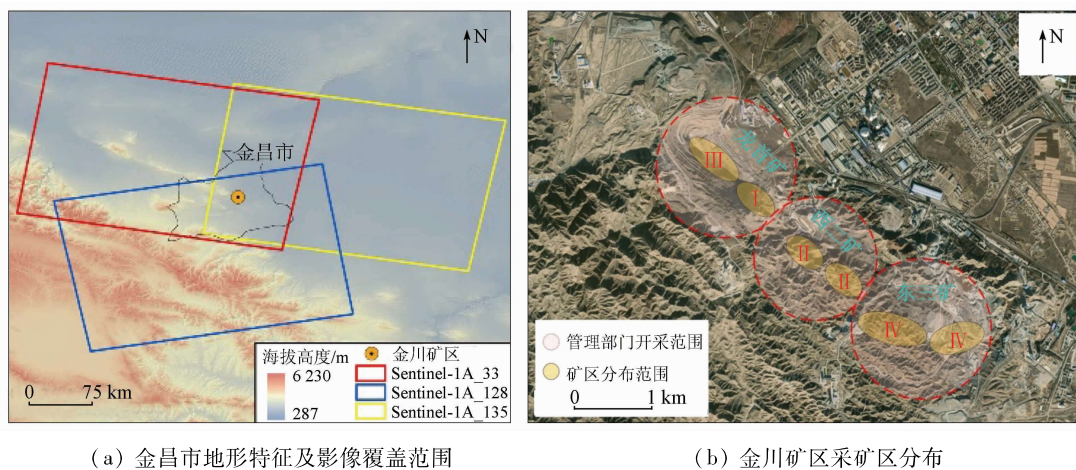


图 1 金川矿区地理位置和 Sentinel-1A 影像覆盖范围

Fig. 1 Geographic location and Sentinel-1A image coverage of Jinchuan mining area

1.2 数据源

Sentinel-1A 卫星是欧洲航天局和欧盟委员会推出的哥白尼计划中的首个空间对地观测卫星,搭载 C 波段雷达传感器^[24],重访周期为 12 d,包含 4 种工作模式:条带模式(strip map, SM),干涉宽幅模式(interferometric wide, IW),超宽幅模式(extra-wide swath, EW)以及波束采集模式(wave mode acquisitions, WM)^[25]。其中 IW 模式采用 TOPSAR (Terrain observation with progressive scans SAR) 技术成像,幅宽为 240 km,空间分辨率为 5 m × 20 m,影像质量较高,噪声更易处理。此外,相同极化(VV)比交叉极化对地物的介电常数和表面粗糙度更敏

感^[26],因此,本研究选择 IW 模式、VV 极化的雷达影像。

本研究选用 3 个轨道(升轨 128,降轨 33 和 135)的 Sentinel-1A 数据反演金川矿区时序三维形变,下载获取了覆盖研究区 128 轨道(2018 年 1 月 2 日—2020 年 10 月 6 日)81 景、33 轨道(2018 年 1 月 7 日—2020 年 10 月 23 日)81 景和 135 轨道(2018 年 3 月 27 日—2020 年 10 月 11 日)71 景影像,影像参数如表 1 所示^[19]。此外,本文利用数字高程模型(digital elevation model, DEM)去除地形相位并对形变结果进行地理编码,DEM 选用美国国家航空航天局、美国国家测绘局和德国、意大利航天局联合绘制

的 SRTM (shuttle Radar topography mission) 地形数据,空间分辨率为 $90\text{ m}^{[26]}$ 。为了验证本文形变监测结果的有效性和准确性,选取部分水准测量数据^[18]与研究区的时序 InSAR 结果做了检验。

表 1 Sentinel - 1A 影像参数
Tab. 1 Sentinel - 1A image parameters

轨道号	轨道模式	入射角 $\theta/(^{\circ})$	方位角 $\alpha/(^{\circ})$
128	升轨	34.174 4	186.940
33	降轨	44.638 7	187.807
135	降轨	41.424 3	354.702

2 研究方法

2.1 SBAS - InSAR 技术

SBAS - InSAR 是由 Berardino 等^[25]和 Lanari 等^[27]提出的时间序列 InSAR 分析技术,该技术通过将获取的数据进行分组配对,得到一系列短的空间基线差分干涉图集,利用奇异值分解法 (singular value decomposition, SVD) 将独立的数据集进行连接并生成相干目标的平均形变速率和时间序列累计沉降值^[28]。SBAS - InSAR 技术的优势是充分利用了多时相的 SAR 数据,提高了形变测量的时间采样率和空间覆盖率^[28]。本文数据处理中,SBAS - InSAR 流程如图 2 所示。具体流程如下:

1) 干涉对组合和连接图生成。将获取的数据按时间和空间阈值进行分组配对,综合考虑时相数、

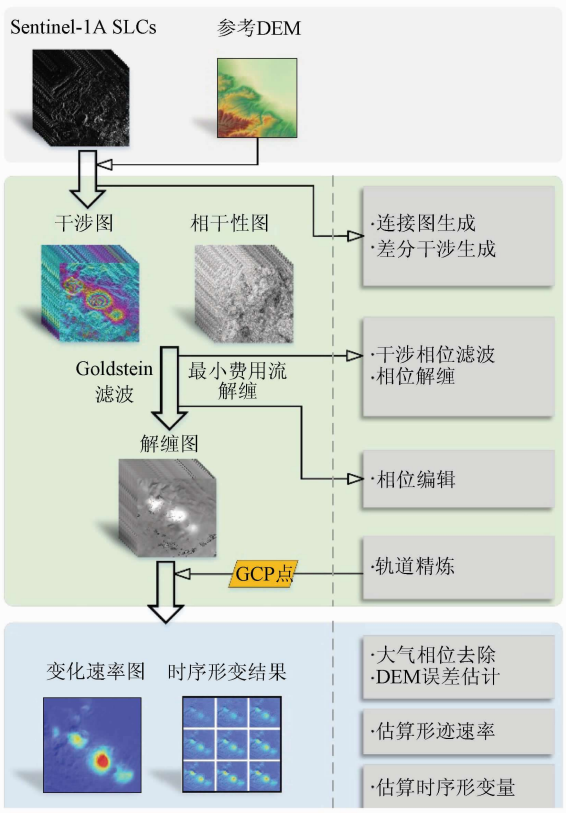


图 2 SBAS - InSAR 处理流程
Fig. 2 SBAS - InSAR processing flow

影像质量和计算机的处理能力设置阈值,本研究中 3 个轨道时间基线阈值均设为 240 d,空间基线阈值设为 45%。超级主影像由软件自动选取,原则为时间基线和最小,影像日期分别为: 2018 年 7 月 13 日 (升轨 128)、2018 年 12 月 28 (降轨 33)、2019 年 3 月 22 日 (降轨 135),生成时空基线图如图 3 所示。

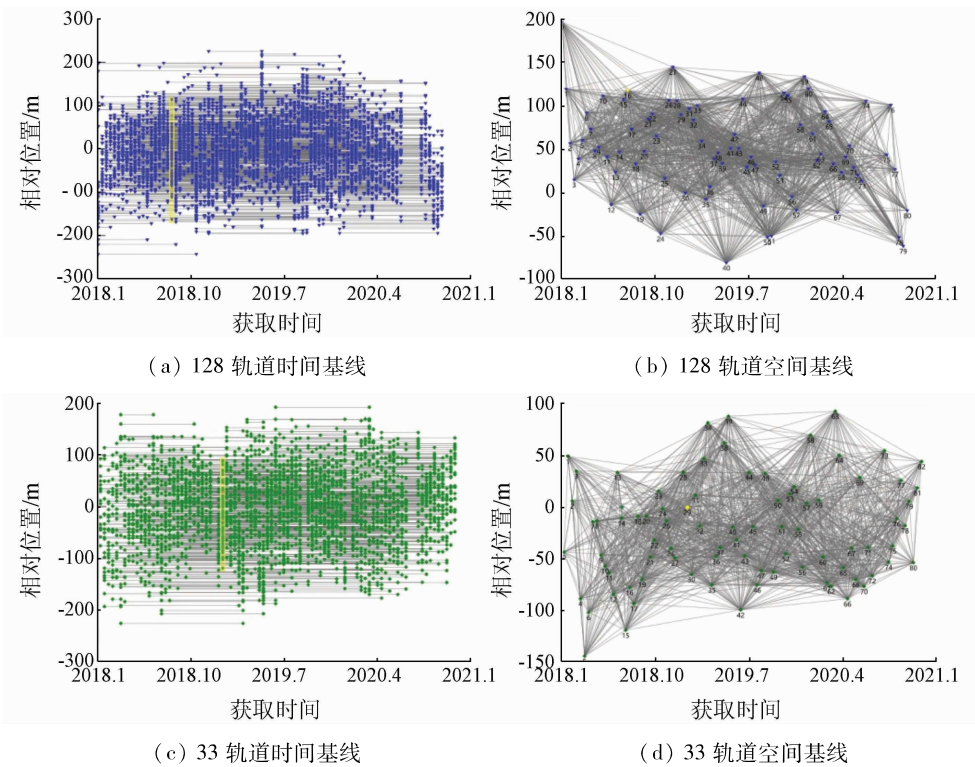
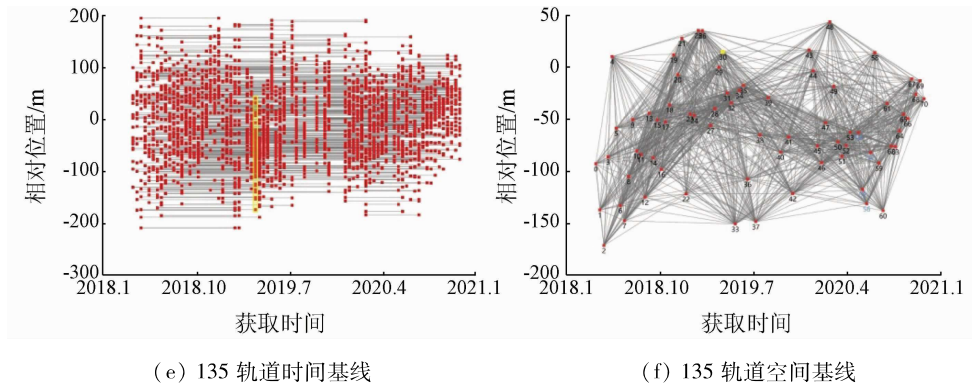


图 3 - 1 不同轨道时空基线
Fig. 3 - 1 Spatiotemporal baseline diagram of different paths



(e) 135 轨道时间基线

(f) 135 轨道空间基线

图 3-2 不同轨道时空基线

Fig. 3-2 Spatiotemporal baseline diagram of different paths

2) 干涉 workflow 处理, 包括干涉图生成、去平、滤波和相位解缠。首先, 利用复数像对共轭相乘得到干涉图, 为了提高原始影像的信噪比和相干性, 多视比设置为 4:1; 其次, 利用参考 DEM 去除地形相位; 接着选用 Goldstein 自适应滤波算法进行干涉相位滤波; 最后, 利用最小费用流解缠方法获得差分干涉序列的解缠相位图, 解缠相干性阈值设置为 0.2。

3) 轨道精炼和重去平。各轨道数据分别选取 30 个地面控制点 (ground control points, GCP), 且满足 GCP 相干性良好、远离形变区, 用残余相位优化方法来估算和去除残余的固定相位和解缠后还存在的相位坡道。

4) SBAS-InSAR 反演。首先, 通过选择和细化 GCP 来估算相位坡道^[29]; 其次, 利用线性模型估计位移速率和残余地形; 最后, 采用 SVD 方法获取时间序列地表形变。在估计平均形变速率后, 通过利用时间域高通滤波和空间域低通滤波去除大气相位

延迟。

5) 反演结果进行地理编码。DEM 作为坐标参考, 生成坐标系 (GCS-WGS-84) 下的 LOS 形变和垂直向形变。

2.2 三维形变构建方法

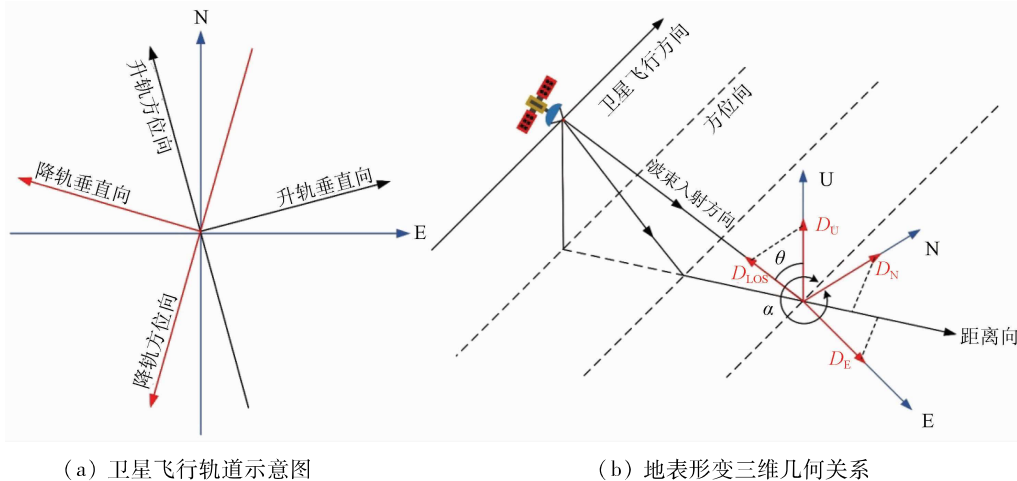
2.2.1 InSAR 观测方程

SAR 卫星多采用近极地轨道, 雷达波束照射到同一地面区域时飞行状态有 2 种: 一种是由南向北, 称为升轨; 一种是由北向南, 称为降轨 (图 4 (a))。由于升降轨使用同一卫星平台, 成像时各项物理参数几乎未发生变化, 所以影像质量一致性较好。升降轨成像最大的区别就是雷达波束入射角和卫星飞行的方位角不同, 利用这一特征, 可以构建形变监测结果的三维分解模型^[30]。InSAR 观测结果是将真实形变投影到 LOS 方向上, LOS 向的形变又可以分解到垂直、东西、南北向上, 其几何关系如图 4 (b) 表示, 其关系式为:

$$D_{\text{LOS}} = D_{\text{U}} \cos \theta - D_{\text{N}} \sin \theta \cos (\alpha - 3\pi/2) - D_{\text{E}} \sin \theta \sin (\alpha - 3\pi/2), \quad (1)$$

式中: D_{LOS} 为真实形变投影到 LOS 向形变值; D_{U} , D_{N} 和 D_{E} 分别表示垂直向、南北向和东西向形变 (约

定垂直向上、北向、东向为正); θ 为 SAR 传感器入射角; α 为卫星飞行方位角。



(a) 卫星飞行轨道示意图

(b) 地表形变三维几何关系

图 4 SAR 卫星飞行方向和地表形变三维几何关系

Fig. 4 Satellite flight direction and 3D geometric relationship of land deformation

2.2.2 结合先验条件的最小二乘迭代法

结合先验条件的最小二乘迭代法^[30]是利用已知条件或者假设可信已知条件作为多余观测,迭代使用最小二乘法求解矛盾方程获得变量近似解的间接求解方法。Sentinel-1A 升降轨道均为近极地轨道,三维形变分解中南北向对形变信息极不敏感^[31],则可以将南北向位移值向极小值逼近作为初

$$\begin{bmatrix} D_{\text{LOS1}} \\ D_{\text{LOS2}} \\ D_{\text{LOS3}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \cos (\alpha_1 - 3\pi/2) & -\sin \theta_1 \sin (\alpha_1 - 3\pi/2) \\ \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \cos (\alpha_2 - 3\pi/2) & -\sin \theta_2 \sin (\alpha_2 - 3\pi/2) \\ \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 \cos (\alpha_3 - 3\pi/2) & -\sin \theta_3 \sin (\alpha_3 - 3\pi/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_U \\ D_N \\ D_E \end{bmatrix} \quad (2)$$

首先设 D_N 为 0, 增加多余观测, 此时未知数为 D_E 和 D_U , 而 3 个轨道可构成 3 个观测方程, 利用最小二乘法可以求得 D_E 和 D_U , 由于 D_U 分解敏感度较高, 认为 D_U 数值是可靠的。此步骤将 D_N 设为 0, 因为南北向分解敏感度较低, 设为 0 可作为条件约束, 但不表示南北向位移为 0, 在前两步约束求解之后可依据 D_E 和 D_U 求解 D_N 的近似值。

2) 获得 D_U 之后, 将其代入式(2)构成多余观测, 2 个未知数为 D_N 和 D_E , 再次运用最小二乘法求解 D_N 和 D_E , 为了提高 D_U 求解精度, 只将 D_E 作为可靠值代入下一步。

3) 设式(1)~(2)中求得的 D_U 和 D_E 视为真值, 此时未知数只有一个即 D_N 。3 个条带的方程均可求出 D_N , 此时构成 2 个多余观测, 再次运用最小二

乘求解得到 D_N 。

1) 获得多个轨道时序 InSAR 结果之后, 根据式(1), 联立三维求解方程组, 下标表示 3 个不同轨道, 矩阵形式表示为:

3 金川矿区地表三维形变特征

3.1 地表三维形变速率特征

利用 SBAS-InSAR 和三维形变解算后, 得到三维形变速率(图 5)。图 5(a) 为垂直向形变速率, 图中龙首矿、西二矿、东三矿开采区出现了 3 个明显的形变区 A、B 和 C, 从西北至东南方向依次分布, 其中 A 区形成一个长轴约为 2.6 km, 短轴约为 0.9 km, 面积约为 1.1 km² 的椭圆状形变区, 垂直向最大形变速率为 -132.4 mm/a; B 区形成一个形变面积约为 1.8 km² 的圆形形变区, 垂直向最大形变速率为 -162.8 mm/a; C 区形成一个面

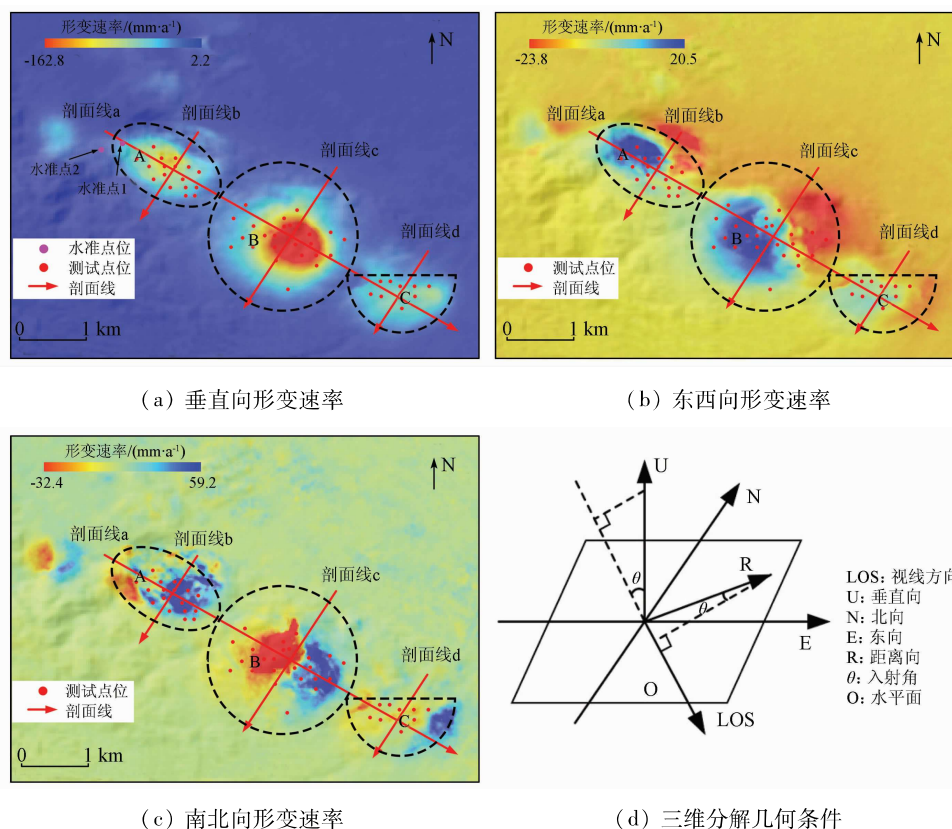


图 5 金川矿区三维形变速率

Fig. 5 3D deformation rate in Jinchuan mining area

积约为 0.71 km^2 的半圆形形变区,垂直向最大形变速率为 -52 mm/a 。图 5(b) 为东西向形变速率,图中 3 个形变区的西部均向东发生少量形变,最大形变速率为 20.5 mm/a ;东部向西收缩,最大形变速率约为 -23.8 mm/a 。图 5(c) 为南北向形变速率,3 个沉降区西部均向南发生形变,最大形变速率约为 -32.4 mm/a ;东部均向北发生形变,最大形变速率约为 59.2 mm/a 。综上,B 形变区整体

形变速率最大,A 区次之,C 区由于东三矿建成投产时间较短,开采力度较小,整体形变速率最小。

3.2 地表三维形变时序累计形变量特征

为分析矿区形变过程,解算 2018 年 1 月—2020 年 10 月 6 个时段的三维累积形变值(图 6),便可知晓该过程。从图 6 中可以看出,3 个形变区的形变范围逐渐扩大,相对于 2018 年 1 月,垂直向累积形变值在逐渐增大,研究时段内的最大累积形变值为

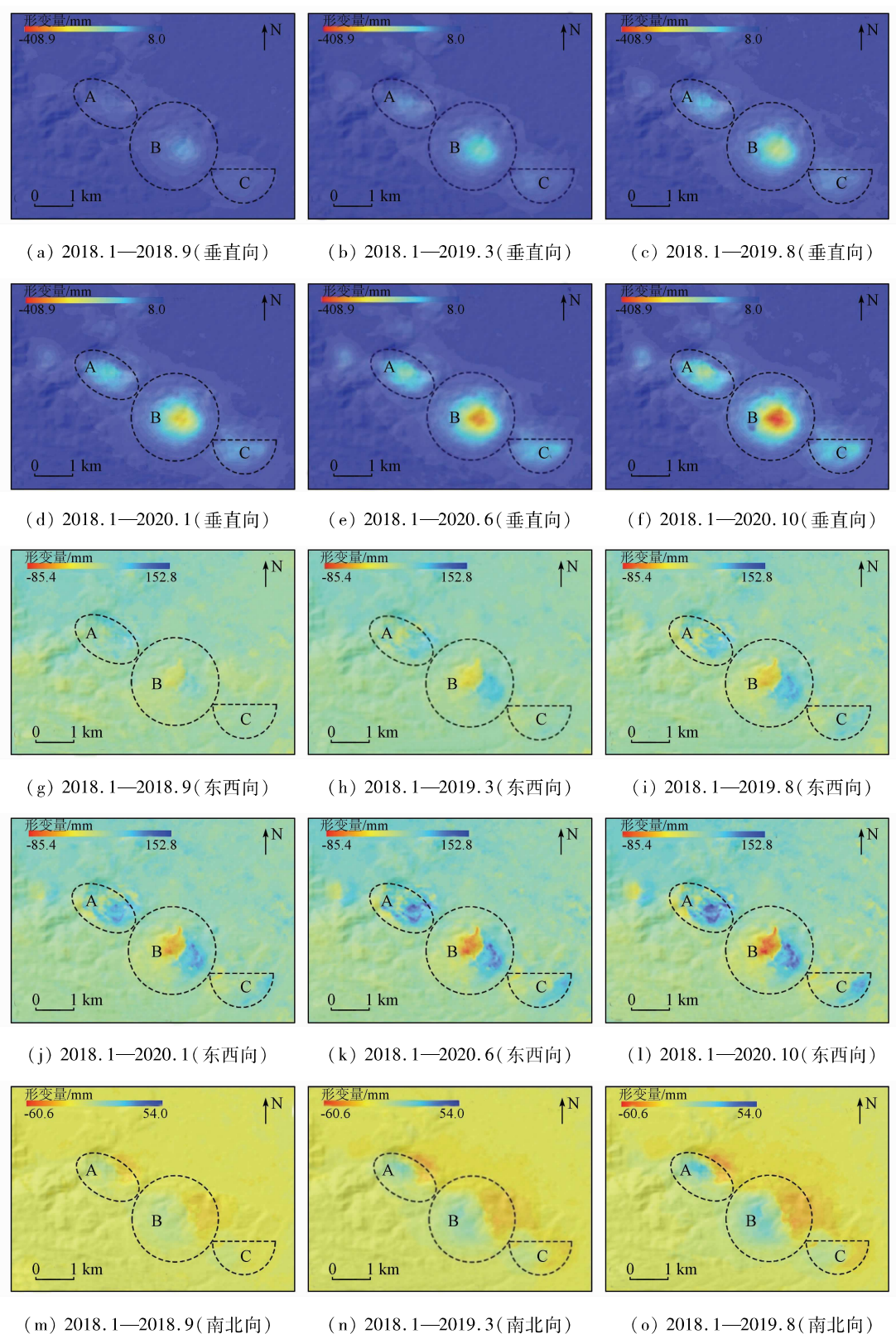


图 6-1 金川矿区地表三维累积形变

Fig. 6-1 3D land cumulative deformation in Jinchuan mining area

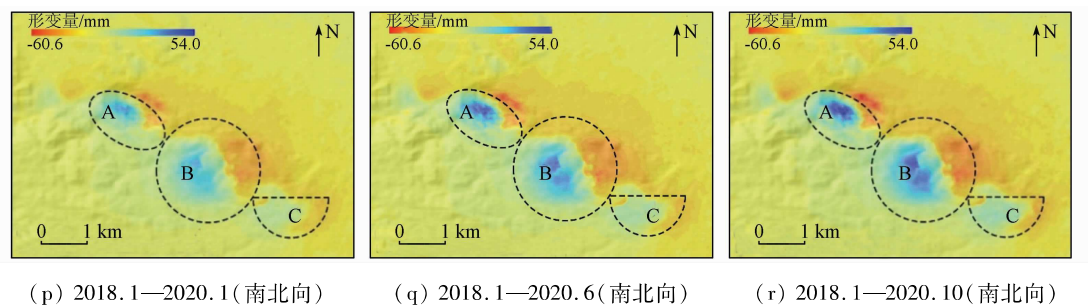


图 6-2 金川矿区地表三维累积形变
Fig. 6-2 3D land cumulative deformation in Jinchuan mining area

-408.9 m。此外,东西向和南北向的累积形变值也在逐渐增大,其中,东西向形变范围为-85.4~152.8 mm,南北向形变范围为-60.6~54.0 mm。金川矿区垂直向的形变趋势主要表现为地面沉降,西二矿开采区的累积形变值最大,龙首矿次之,东三

矿开采区的累积形变值最小。水平位移趋势均表现为形变区西北部和东南部向中部收缩。

为进一步分析形变区的时序特征,求取图 5(a)中剖面线 a,b,c 和 d 在 2018 年 1 月—2020 年 10 月期间 6 个时段的剖面图(图 7)。

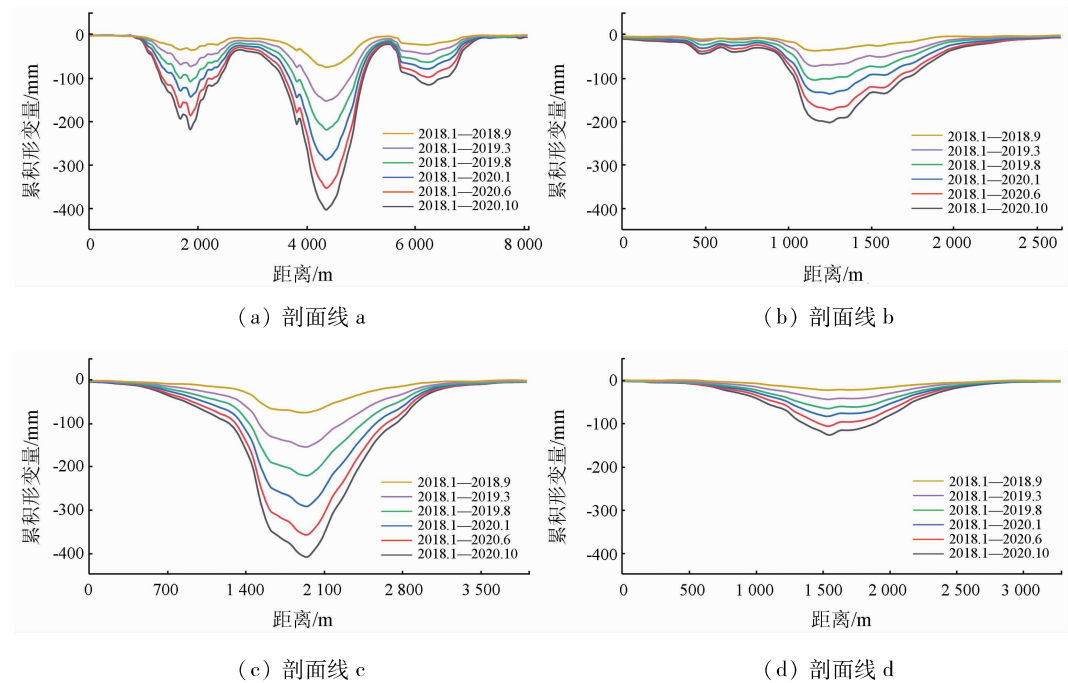


图 7 金川矿区垂向形变时序剖面图形变区及剖面线位置

Fig. 7 Time series profile of vertical deformation in Jinchuan mining area deformation zone and section line location

剖面线 a 的坐标方位角为 124°,全长 8 233 m,呈 NW-SE 走向同时穿过 A,B 和 C 形变较为显著的区域,在 1 796 m,4 321 m 和 6 282 m 处出现 3 个沉降漏斗;剖面线 b,c 和 d 坐标方位角均为 214°,全长分别为 2 703 m,3 920 m 以及 3 274 m,在 b,c 和 d 上 1 451 m,1 952 m 和 1 528 m 处分别出现沉降漏斗。由剖面线趋势可以发现,3 个形变区中沿 NW-SE 向的剖面形变曲线基本符合 Peck 公式^[32],NE-SW 向的剖面图显示:形变区 A,B 和 C 的东北边界出现骤降趋势,可能原因是受到自西向南开采活动的影响且受到断层控制。图 7 中剖面线横坐标取特定值时,各时相累积形变曲线的间距近似相等,可推断 3 个形变区在近匀速沉降。为验证该论断,在形变区均匀抽样选取测试点,位置分布如图 5(a)所

示。绘制测试点累积形变曲线见图 8,结果显示,50 个测试点的形变曲线表现为均近直线形变趋势。因此,可认为金川矿区的 3 个形变区,整体在匀速沉降,形变速率伴随空间位置的不同而发生变化。

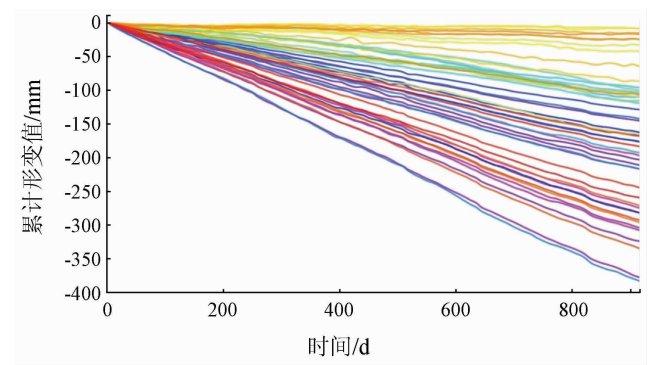


图 8 测试点形变曲线
Fig. 8 Settlement curve of test points

4 讨论

4.1 多轨道相关性分析

图 9 给出了 3 个轨道垂直向形变速率的相关性密度散点图。从图 9 中可以看出,升轨 128 与降轨 33 和 135 轨道散点图的相关系数分别为 0.68 和 0.81,由于卫星飞行的方向和视角不同,虽然导致了散点图左右两侧的偏离度增加,但却形成了三维形

变分解的几何条件。由于卫星飞行方向视角接近,降轨 33 和 135 轨道的密度散点图表现出较高的相关性,相关系数为 0.96,相关直线的斜率接近 0.5。综上,3 个不同轨道既构成了立体观测条件,其监测结果又体现出较好的相关性,说明本文 SBAS-InSAR 处理结果可信度较好,三维形变分解方法较为合理。为了进一步证明时序 InSAR 的监测性能,选取实测数据对本文的监测结果进行验证。

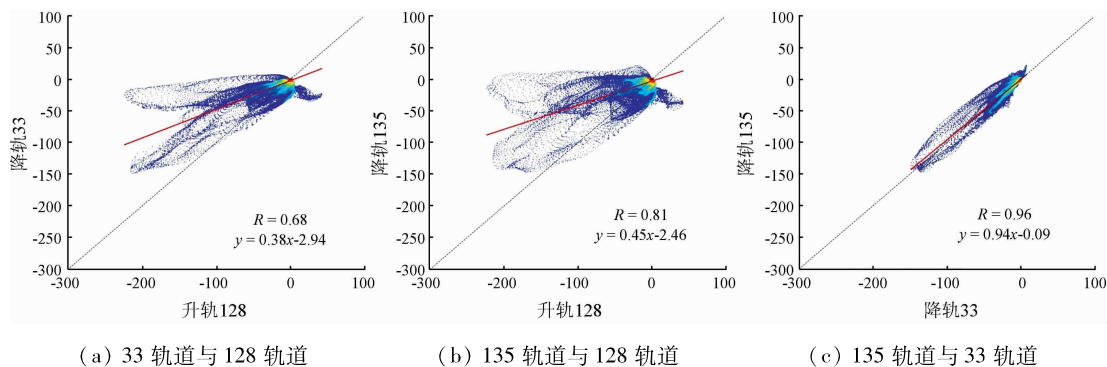


图 9 不同轨道形变速率相关性密度散点图

Fig. 9 Density scatter diagram of correlation between deformation rates of different paths

4.2 三维分解结果对比验证

根据 2019 年 6 月和 7 月的水准实测数据^[18],选择点位清晰、完整性较好的水准点 1 和 2 位置如图 5(a)所示,用于验证本文三维形变的结果。由于水准实测数据记录了所在点位的当月垂直向累积形变值,因此仅对垂直向分解结果进行验证。提取水准点位置 20 m 半径圆形缓冲区内同时期的 SBAS-In-

SAR 时序垂向形变矢量监测点,求其平均,将结果与水准监测值进行比较。从图 10 可以看出,2 个水准点的分解结果与水准测量结果的趋势基本相同,最大误差的绝对值分别为 1.3 mm 和 0.7 mm。说明,SBAS-InSAR 的监测结果与水准测量结果具有较高的一致性,证明本文实验参数的设置较为合理,表明本文中的三维解算结果总体上是可靠的。

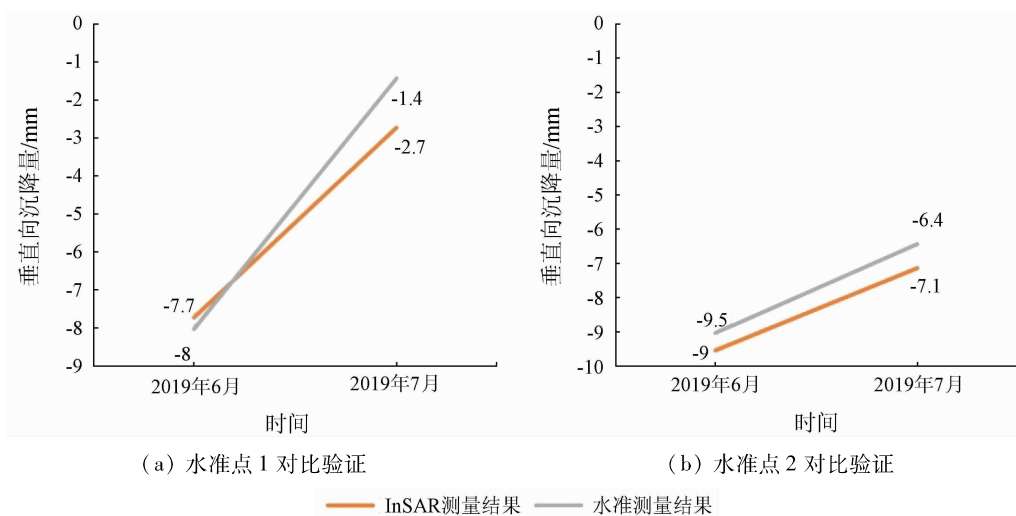


图 10 垂向分解结果与水准数据的验证

Fig. 10 Verification of vertical decomposition results with leveling data

上述通过水准数据验证了基于先验条件的最小二乘迭代法进行地表形变三维分解的可靠性,为凸显本文方法的优势,将本文方法与常用三维分解算法进行对比分析。

联合 GPS 数据和 InSAR 监测数据的三维形变

求解方法可以高效高精度地求解地表三维形变,但是这种方法对数据有较高的要求,主要为:时间域统一、空间域统一、数据融合权重的统一^[33]。本文方法采用基于同源数据多视角观测的形变三维分解策略,摆脱了对数据统一性的要求,并且在精度控制

上不断进步^[34-36]。直接求解法和基于先验条件的最小二乘迭代法均为基于同源数据多视角观测的形变三维分解策略,直接求解法是对式(1)直接联立方程组进行求解。将利用直接求解法计算获得的三维形变速率与本文方法计算的结果进行对比分析,图 11 为直接求解法和基于先验条件的最小二乘法求解的 2019 年三维形变速率。从图 11 中可以看出,直接求解法解算的三维形变速率东西向和南北向均没本文方法效果好,尤其南北向的三维形变速率精度较差,这可能是直接求解法中由于 InSAR 观测对南北向形变极不敏感,解算结果必然存在误差放大现象,误差最大可达数十厘米^[37],获取的形变

并不能代表真实的运动情况,因此,本文方法尝试在有效降低形变解算误差的同时,重建了更为真实可靠的三维形变场。此外,本文将图 10 中水准数据形变量换算至形变速率,并与直接求解法和本文方法进行垂直向对比验证(表 2),结果显示:直接求解法解算结果整体偏小,最大误差达到 33.8 mm/a;本文方法中最大误差为 6.2 mm/a,结果较为理想,证明了本文方法的可靠性和可行性。依据精准的三维形变监测结果,可以预防并防治相关灾害的发生。然而,形变机理的科学分析,是减缓形变演化行之有效的方法,鉴于此,就金川矿区 2018 年初—2020 年末形变发生的机理进行讨论。

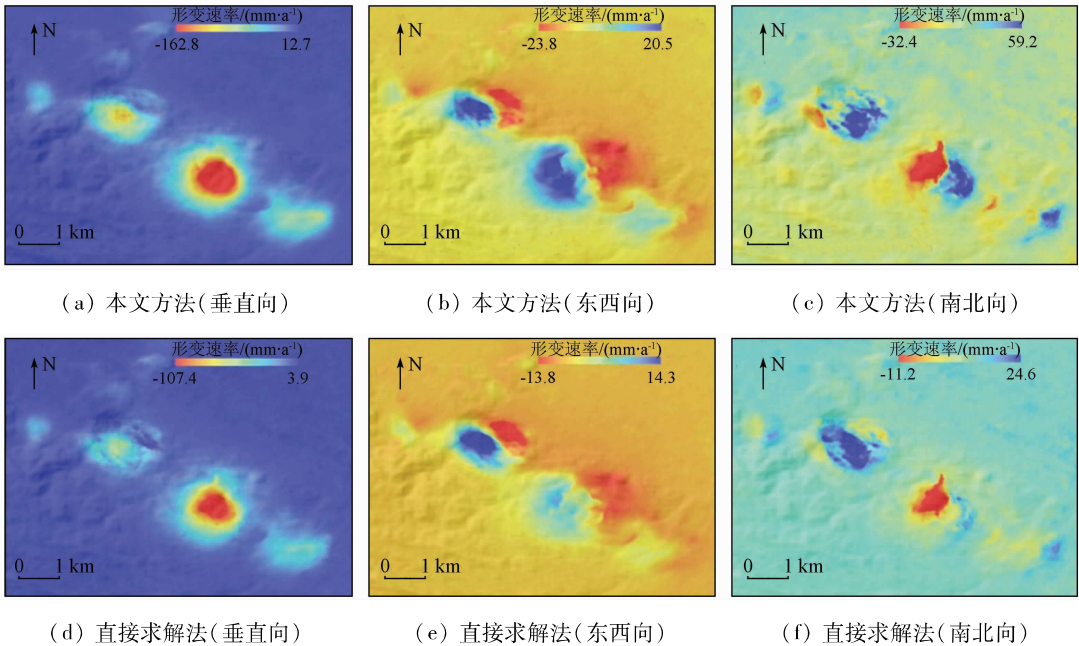


图 11 2019 年金川矿区三维形变速率对比验证

Fig. 11 Comparison and verification of 3D deformation rate in Jinchuan mining area in 2019

表 2 垂直向形变速率对比验证

Tab. 2 Vertical deformation rate comparison verification

(mm·a ⁻¹)			
水准点位	水准数据	直接求解法	本文方法
1	-95.4	-61.6	-89.7
2	-56.4	-41.1	-50.2

4.3 金川矿区地表形变机理

在采矿区发生地表形变的关键因素一般涉及到机械化开采导致的地表应力变化、断层的空间分布和岩性的结构强度^[19],因此,将从地表形变与人机采动、研究区断层分布和岩性构造 3 方面分析矿区地表形变机理。

1) 矿区地表形变与人机采动的关系。2018 年复采后,采用无底柱分段崩落法采矿^[19],矿物从地下被开采出以后,矿房内部和周围的应力状态失稳,为了重新达到应力平衡,在采矿区上方覆盖的岩层以及地表地物重力的作用下,岩体的变形和破坏主

要表现为坍塌、断裂、褶皱等形式,继而引发地表形变^[37],形成以矿脉为中心的沉降漏斗。随着开采工作的有序进行,金川矿区的形变趋于稳定。因此,2018—2020 年金川矿区地表形变的原因之一可能是人机采动引起。

2) 矿区地表形变与断层的关系。如图 12 所示,金川矿区北部被 F1 断裂带分割,下盘岩系主要包括侏罗纪—新近纪陆相碎屑沉积岩,上盘主要包括元古代变质岩和古生代沉积岩^[23],岩层曾被多代超基性岩脉侵入,形成了龙首山矿体^[38-39]。随着采矿进行,受 F1 断层控制,上盘未发生明显形变;与矿体相间分布的 F16, F17, F23 与 F1 断层相交,倾角变化范围为 60°~80°,将岩体分割为 4 个矿区,金川矿区形变区域也相应地表现出间断性差异,龙首矿区北邻 F8 断层和 F6 断层,形变区在此断层边界上出现间断,断层北部形变量整体减小,在剖面线 b 中 1 000 m 附近形变量骤增处即为 F6 断层切割;西

南部受到 F3 断层控制出现近似弧形形变边界,整个开采区在断层的作用下形变仅局限在近似椭圆范围内。西二矿开采区除北部分布有 F16 断层外周围再无主要断层存在,故开采区以矿脉为中心不断向周围扩张形成近似圆形形变区,但北部仍然受到断层限制扩张范围有限,且预测在开采工作不断进行过程中除北部受到断层控制外,形变区还会向外继续延伸。东三矿开采区受到 F17 和 F23 断层的控制形变区范围基本局限在 2 个断层中间形成呈半圆形分布。通过以上分析可推断,金川矿区断层的分布控制该区域地表形变。

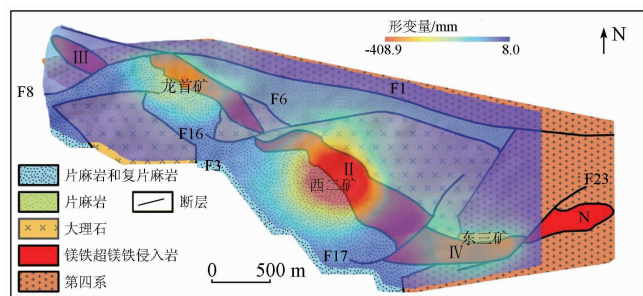


图 12 金川矿区地质构造与累积形变叠加简图^[23]

Fig. 12 Schematic diagram of the relationship between geotectonics and deformation in Jinchuan mining area^[23]

3) 矿区地表形变与岩性的关系。金川矿区岩性复杂,区域差异性较大,龙首矿和西二矿开采区东北部主要为大理岩岩组、片麻岩岩组,主要由白云石和方解石组成,含有少量滑石、石英、方美石和云母等组成,颗粒均匀细小,质地均匀,硬度、结构强度较小,在应力和侵蚀作用下易于发生形变^[28];西南部主要为片麻岩和复片麻岩岩组,主要由长石、石英和云母等组成,此外还包括角闪石、辉石等,颗粒大小不均,质地不均,结构强度整体较强。除岩层结构外,受大陆性温带干旱气候和地表岩性的影响,金川矿区地表形成较厚的一层砂、砾石、黏土和黄土混合松散堆积层,该层整体密度较低,质松软、结构强度较差,堆积层长期受到雨水侵蚀和渗透,降低了黄土、黏土、砂的黏聚强度和基质吸力,破坏了堆积层的稳定状态,砂土覆盖层软化,湿陷性增加^[29],致使矿区人工建筑基础发生坍塌,进而导致覆盖层表面发生形变。金川矿区地表形变会随着人工开采继续进行,且西部开采区的岩体稳定性大于东部开采区^[39],随着镁铁超镁铁侵入岩和超基性岩的多期侵入,节理裂隙发育破碎,东部开采区的沉降也将会更加明显。因此,推断岩性特征也是金川矿区地表形变的控制性因素。

5 结论

本文采用 SBAS-InSAR 技术分别利用 3 个轨道(升轨 128、降轨 33 和 135)的 Sentinel-1A 数据获取金川矿区地表形变速率和形变量,并利用结合先验条件的最小二乘迭代法解算矿区三维地表形变,对 3 个形变区空间变化规律和地表形变机理进行了分析。主要结论如下:

1) 通过 3 个轨道垂直向累计形变值相关性分析实现解算结果的内部互检,并使用水准实测数据对三维形变分解后垂直向累计形变值进行验证,保证了地面形变监测的可靠性。

2) 金川矿区出现 3 个形变区,其中 B 区形变范围、整体形变速率和形变量均为最大;A 区次之;C 区最小。形变方式以沉降为主,最大年平均垂直向形变速率达到 -162.8 mm/a ,最大垂直向累计形变量达到 -408.9 mm 。此外,形变区也同时发生了水平面上的位移,主要表现为 3 个形变区西北部和东南部向形变区中部收缩。

3) 地质断层和岩性构造是矿区形变的控制性因素,F1 断层限制了矿区地表形变向东北向延伸,F16、F17 和 F23 断层的存在使得开采区形变出现间断性差异。人机采动是矿区地表形变的主要因素,无底柱分段崩落法开采造成了开采区在 30 个月内近似均匀形变。

参考文献 (References):

- [1] 尹宏杰. 基于 InSAR 的矿区地表形变监测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
Yin H J. Ground subsidence monitoring in mining area using InSAR[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [2] 中国地质调查局地质环境监测院. 全国矿山地质调查报告[R]. 北京: 中国地质调查局, 2016.
China Institute of Geo-Environmental Monitoring, CGS. National mine geological survey report[R]. Beijing: China Geological Survey, 2016.
- [3] Siriwardane H J, Amanat J. Analysis of subsidence caused by underground mining[J]. International Journal of Mining Engineering, 1984, 2(4): 271-290.
- [4] Nie L, Wang H, Xu Y, et al. A new prediction model for mining subsidence deformation: The arc tangent function model[J]. Natural Hazards, 2015, 75(3): 2185-2198.
- [5] Hui X, Ma F, Zhao H, et al. Monitoring and statistical analysis of mine subsidence at three metal mines in China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(6): 3983-4001.
- [6] Chen B, Li Z, Yu C, et al. Three-dimensional time-varying large surface displacements in coal exploiting areas revealed through in-

- tegration of SAR pixel offset measurements and mining subsidence model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 240: 111663.
- [7] Massonnet D, Feigl K L. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface[J]. *Reviews of Geophysics*, 1998, 36(4): 441–500.
- [8] 李勇发, 左小清, 麻源源, 等. 基于 PS-InSAR 技术和遗传神经网络算法的矿区地表沉降监测与预计[J]. *地球物理学进展*, 2020, 35(3): 845–851.
- Li Y F, Zuo X Q, Ma Y Y, et al. Surface subsidence monitoring and prediction based on PS-InSAR and genetic neural network algorithm[J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(3): 845–851.
- [9] Simons M, Fialko Y, Rivera L. Coseismic deformation from the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, earthquake as inferred from InSAR and GPS observations[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(4): 1390–1402.
- [10] Zhao C, Lu Z, Zhang Q, et al. Mining collapse monitoring with SAR imagery data: A case study of Datong mine, China[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(1): 083574.
- [11] Wempen J M, McCarter M K. Comparison of L-band and X-band differential interferometric synthetic aperture Radar for mine subsidence monitoring in central Utah[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(1): 159–163.
- [12] Carlà T, Farina P, Intrieri E, et al. Integration of ground-based Radar and satellite InSAR data for the analysis of an unexpected slope failure in an open-pit mine[J]. *Engineering Geology*, 2018, 235: 39–52.
- [13] Li J, Gao F, Lu J. An application of InSAR time-series analysis for the assessment of mining-induced structural damage in Panji Mine, China[J]. *Natural Hazards*, 2019, 97(1): 243–258.
- [14] Ma C, Cheng X, Yang Y, et al. Investigation on mining subsidence based on multi-temporal InSAR and time-series analysis of the small baseline subset: Case study of working faces 22201–1/2 in Bu'ertai mine, Shendong coalfield, China[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(11): 951–975.
- [15] Pawluszek – Filipiak K, Borkowski A. Integration of DInSAR and SBAS techniques to determine mining-related deformations using sentinel-1 data: The case study of Rydułtowy mine in Poland[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(2): 242–264.
- [16] Torres R, Snoeijs P, Geudtner D, et al. GMES Sentinel-1 mission[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 9–24.
- [17] Hu J, Li Z W, Zhu J J, et al. Inferring three-dimensional surface displacement field by combining SAR interferometric phase and amplitude information of ascending and descending path[J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(4): 550–560.
- [18] 李强. 基于空天地数据集成的甘肃金川矿区地表沉降监测[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.
- Li Q. Surface subsidence monitoring of Jinchuan mining area in gansu based on space-air-ground integration[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020.
- [19] 耿许可. 基于时序 InSAR 的龙首矿区形变监测研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2018.
- Geng X K. Study of the subsidence-monitoring in dragon head mine area with times series InSAR technology[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.
- [20] 丁宁, 邓清海, 耿许可, 等. 融合时序 InSAR 与 GPS 的龙首矿露天矿坑三维变形规律研究[J]. *金属矿山*, 2019(10): 61–67.
- Ding N, Deng Q H, Geng X K, et al. Study on the 3D deformation regularity of the open pit in Longshou mine based on time series InSAR technique and GPS[J]. *Metal Mine*, 2019(10): 61–67.
- [21] 张拥军, 杨登峰, 王金涛, 等. 露天边坡局部失稳特征的数值分析及监测[J]. *金属矿山*, 2014, 43(10): 142–147.
- Zhang Y J, Yang D F, Wang J T, et al. Numerical analysis and monitoring of local instability characteristics of open pit slope[J]. *Metal Mine*, 2014, 43(10): 142–147.
- [22] Yang S, Yang G, Qu W, et al. Pt-Os isotopic constraints on the age of hydrothermal overprinting on the Jinchuan Ni-Cu-PGE deposit, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2018, 53(6): 757–774.
- [23] Prichard H M, Knight R D, Fisher P C, et al. Distribution of platinum-group elements in magmatic and altered ores in the Jinchuan intrusion, China: An example of selenium remobilization by post-magmatic fluids[J]. *Mineralium Deposita*, 2013, 48(6): 767–786.
- [24] Wang W, He Y, Zhang L, et al. Analysis of surface deformation and driving forces in Lanzhou[J]. *Open Geosciences*, 2020, 12(1): 1127–1145.
- [25] Bernardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375–2383.
- [26] 白泽朝, 汪宝存, 靳国旺, 等. Sentinel-1A 数据矿区地表形变监测适用性分析[J]. *国土资源遥感*, 2019, 31(2): 210–217. doi:10.6046/gtzyyg. 2019.02.29.
- Bai Z C, Wang B C, Jin G W, et al. Applicability analysis of ground deformation monitoring in mining area by Sentinel-1A data[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2019, 31(2): 210–217. doi:10.6046/gtzyyg. 2019.02.29.
- [27] Lanari R, Mora O, Manunta M, et al. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(7): 1377–1386.
- [28] He Y, Chen Y, Wang W, et al. TS-InSAR analysis for monitoring ground deformation in Lanzhou New District, the Loess Plateau of China, from 2017 to 2019[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 67(4): 1267–1283.
- [29] He Y, Wang W, Yan H, et al. Characteristics of surface deformation in Lanzhou with Sentinel-1A TOPS[J]. *Geosciences*, 2020, 10(3): 99–102.
- [30] 王家庆. 2008 年改则地震多视角 InSAR 三维形变场及断层滑动反演[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2015.
- Wang J Q. The three-dimensional deformation field of the 2008 Gaize Tibet earthquake resolved from InSAR measurements with multi-incidence angle and inversion of fault slip distributions[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2015.
- [31] Wright T J, Parsons B E, Lu Z. Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(1): 1–5.
- [32] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// *Proc. 7th ICSMFE*, 1969: 225–290.

- [33] 张鹏飞. 基于时序 InSAR 技术的山区煤矿开采沉陷监测研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学(徐州), 2014.
Zhang P F. Research on mining subsidence monitoring of mountain coal mine based on time - series InSAR technology [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology(Xuzhou), 2014.
- [34] 胡俊. 基于现代测量平差的 InSAR 三维形变估计理论与方法 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.
Hu J. Theory and method of InSAR 3D deformation estimation based on modern measurement adjustment [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [35] 王志伟. 基于多源 InSAR 数据的三维地表形变解算方法研究 [J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 1206.
Wang Z W. Research on 3D surface deformation calculation method based on multi - source InSAR data [J]. Journal of Geomatics and Mapping, 2019, 48(9): 1206.
- [36] 祝传广. 融合多源 SAR 影像的形变监测研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学(徐州), 2015.
Zhu C G. Research on deformation monitoring based on multi - source SAR image fusion [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology(Xuzhou), 2015.
- [37] 刘志敏, 李永生, 张景发, 等. 基于 SBAS - InSAR 的长治矿区地表形变监测 [J]. 国土资源遥感, 2014, 26(3): 37 - 42. doi:10.6046/gtzyyg. 2014. 03. 06.
Liu Z M, Li Y S, Zhang J F, et al. An analysis of surface deformation in the Changzhi mining area using small baseline InSAR [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(3): 37 - 42. doi:10.6046/gtzyyg. 2014. 03. 06.
- [38] Li X, Wang S J, Liu T Y, et al. Engineering geology, ground surface movement and fissures induced by underground mining in the Jinchuan nickel mine [J]. Engineering Geology, 2004, 76(1 - 2): 93 - 107.
- [39] Sun Q, Ma F, Guo J, et al. Deformation failure mechanism of deep vertical shaft in Jinchuan mining area [J]. Sustainability, 2020, 12(6): 2226 - 2248.

InSAR monitoring of 3D surface deformation in Jinchuan mining area, Gansu Province

YANG Wang^{1,2,3}, HE Yi^{1,2,3}, ZHANG Lifeng^{1,2,3}, WANG Wenhui^{1,2,3}, CHEN Youdong^{1,2,3}, CHEN Yi^{1,2,3}

(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 Jinchuan mining area is the largest nickel production base in China. However, the surface deformation in the mining area has not been monitored since 2018 when the plan for restoring mining was proposed. Based on the Sentinel - 1A data of three orbits (ascending orbit 128 and descending orbits 33 and 135), this study obtained the 3D surface deformation rates and time - series displacement by applying the small baseline subset InSAR (SBAS - InSAR) and the least - squares iterative method combining prior conditions. The results are as follows. Three large deformation areas have formed in three mining areas (i. e., the Longshou, Xi'er, and Dongsan mines). The deformation in these areas is primarily present as surface subsidence, with the maximum vertical subsidence and subsidence rate (i. e., -408.9 mm and -162.8 mm/a, respectively) occurring in the Xi'er Mine. For the Longshou Mine, the southwestern and northeastern slopes contract toward ore veins. For the Xi'er and Dongsan mines, the deformation areas show similar displacement directions, that is, the eastern and western sides of subsidence funnels contract toward ore veins. The surface deformation in the Jinchuan mining area is closely related to man - machine mining, geological faults, and lithologic structures. Among them, man - machine mining is the main cause for the surface deformation, while faults and lithologic structures serve as the controlling factors of the surface deformation. The results of this study will provide theoretical support for safe production and mining planning in the Jinchuan mining area.

Keywords: deformation monitoring; SBAS - InSAR; 3D decomposition; Jinchuan mining area

(责任编辑: 陈理)