



引文格式: 马露, 陈莹, 蔺楠. 基于多源遥感数据的矿山生态环境监测技术研究: 以陕北煤炭基地某生产矿山为例 [J]. 西北地质, 2025, 58(2): 91–101. DOI: 10.12401/j.nwg.2024110

Citation: MA Lu, CHEN Ying, LIN Nan. Research on Mine Ecological Environment Monitoring Technology Based on Multi-source Remote Sensing Data: A Case Study in Northern Shaanxi Coal Base[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 91–101. DOI: 10.12401/j.nwg.2024110

基于多源遥感数据的矿山生态环境监测技术研究: 以陕北煤炭基地某生产矿山为例

马露, 陈莹, 蔺楠

(西安煤航遥感信息有限公司, 陕西 西安 710199)

摘要: 矿产资源的开发会对周边生态环境产生负面作用, 影响当地居民的生产生活。相比传统的矿山生态环境地面监测手段, 遥感技术具有宏观性、动态性和经济性等优势, 其高波谱分辨率、高空间分辨率及高时间分辨率, 能全方位动态反映矿山生态问题现状与发展趋势。陕北煤炭基地是中国重要的煤炭能源基地之一, 本研究选择其中一座生产矿山作为研究区, 综合运用光学遥感和雷达遥感技术, 精准捕捉煤矿开采活动所诱发的地面塌陷、土地损毁以及地表水体、植被状况等区域要素特征; 针对重点监测区, 进一步引入无人机遥感技术, 实现对地裂缝、不稳定边坡等局部要素的精细化监测与识别, 系统构建了数据获取、数据处理、遥感解译、数据分析等全流程矿山生态环境遥感监测技术体系。研究结果表明, 多源遥感技术凭借卓越的全局视野、宏观分析能力及强大的数据追溯性, 在矿山生态环境监测领域展现出了无可替代的优势, 应用成效显著。在此基础上, 提出了未来矿山生态环境监测预警智能体系“多网融合+实时监测+智能作业+任务协同+全面感知+自主决策”的发展方向。

关键词: 卫星遥感; 无人机航空摄影; 合成孔径雷达; 矿山生态环境监测; 生态修复

中图分类号: P237

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)02-0091-11

Research on Mine Ecological Environment Monitoring Technology Based on Multi-source Remote Sensing Data: A Case Study in Northern Shaanxi Coal Base

MA Lu, CHEN Ying, LIN Nan

(Xi'an Meihang Remote Sensing Information Co., Ltd., Xi'an 710199, Shaanxi, China)

Abstract: The exploitation of mineral resources can have negative effects on the local ecological environment and the livelihoods of nearby residents. Remote sensing technology provides a more cost-effective and comprehensive approach to monitoring mine ecology compared to traditional ground-based methods. Its high spectral, spatial, and temporal resolution enables a comprehensive and dynamic reflection of the status and development trends of ecological issues in mines. The northern Shaanxi coal base is a significant coal energy base in China.

收稿日期: 2023-09-08; 修回日期: 2024-07-25; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 陕西省秦创原矿山环境修复治理与智能化监测“科学家+工程师”队伍(2022KXJ-087)。

作者简介: 马露(1983-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事国土空间生态修复研究工作。E-mail: cyyy961@163.com。

This paper focused on a production mine, comprehensively utilized Optical Remote Sensing and Radar Remote Sensing technologies, we can accurately capture the characteristics of regional elements such as ground subsidence, land damage, as well as surface water and vegetation conditions induced by coal mining activities. For key monitoring areas, the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) remote sensing technology further enables refined monitoring and identification of local elements such as ground fissures and unstable slopes. This has systematically established a comprehensive remote sensing monitoring technology system for mine ecological environment, encompassing data acquisition, data processing, remote sensing interpretation, and data analysis. Research results indicate that multi-source remote sensing technology, with its outstanding global perspective, macro-analysis capabilities, and robust data traceability, has demonstrated an irreplaceable advantage in the field of mine ecological environment monitoring, achieving remarkable application effects. According to the proposal, the future intelligent mine environmental monitoring and early warning system should be developed with a focus on “multi-network integration + real-time monitoring + intelligent operation + task collaboration + comprehensive perception + autonomous decision-making”.

Keywords: satellite remote sensing; UAV aerial photogrammetry; synthetic aperture radar; mine ecological environment monitoring; ecological restoration

矿产资源作为一种不可再生资源,是人类赖以生存和发展的重要物质基础(Johansen et al., 2019; Gallwey et al., 2020)。在为人类生产生活提供服务的同时,矿产资源开发利用引起的生态环境问题日益严峻(杨金中等, 2017),成为制约矿山及周边区域可持续发展的关键因素(Chen et al., 2017; Li et al., 2021)。建设生态文明是中华民族永续发展的千年大计,矿山生态保护和修复推进生态文明建设的重要一环(蔺楠等, 2023)。矿山生态环境监测能够及时掌握矿山生态环境现状和发展趋势,从而提出合理的预防和修复措施,助力矿产资源开发利用和矿山生态修复统一协调发展(陈国良等, 2023),因此,矿山生态环境监测是一项紧密围绕国家需求,具有基础性、战略性、实用性和紧迫性的重要工作,对于矿区生态保护和修复具有重大意义(黄登冕等, 2022)。

水准测量、三角高程测量与 GNSS 等方法虽然在矿山生态环境监测中可以获取高精度的监测数据,但存在耗时费力、时效性低等不足,并且难以获取生态环境的整体状况,缺少整体性和宏观性(廉旭刚等, 2023)。随着遥感技术的不断发展,其在矿山监测领域的应用潜力得到了更为深入的发掘与拓展(王凤娟, 2020; 韩海辉等, 2020, 2022a)。合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术具有全天时、全天候、空间覆盖广、多极化观测的优势,能够快速获取地表形变的范围,监测精度能够达到毫米级,用于初步圈定采空地面塌陷和不稳定边坡等地质安全隐患发生的区域(陈国良等,

2023; 廉旭刚等, 2023); 光学卫星遥感数据具有覆盖面积大、成本低的优点,多用于解译土地损毁、地表水和植被等面上要素,但受限于空间分辨率,其监测不稳定斜坡、地裂缝的能力有限,可采用无人机航拍获取高分辨率影像数据进行补充,还可以配备热红外、LiDAR、高光谱、多光谱等不同的载荷,根据不同的监测对象和精度要求采集数据并进行相应处理(高俊华等, 2022)。基于多源遥感数据构建矿山监测技术体系,实现矿山生态环境多要素(地质安全隐患、土地损毁、地表水、植被等)协同监测,对促进资源开发与环境保护的协调发展具有重要意义(范立民, 2017; 徐友宁等, 2022; 韩海辉等, 2022b)。笔者以陕北煤炭基地某生产矿山作为研究区,基于高分卫星遥感数据、无人机航空摄影数据及合成孔径雷达数据 3 种不同的数据源,从数据获取、数据处理、遥感解译、数据分析等全流程对研究区地质安全隐患、土地损毁、水资源影响及生态退化进行全方位监测,旨在为合理制定生态修复措施、提升矿区生态环境质量提供基础数据和技术支撑。

1 研究区概况

1.1 矿山基本情况

研究区位于榆林市横山区(图 1),地处毛乌素沙漠东南缘与陕北黄土高原接壤地带,地表被第四系松散沉积物覆盖,较大沟谷中基岩零星出露。区内大部

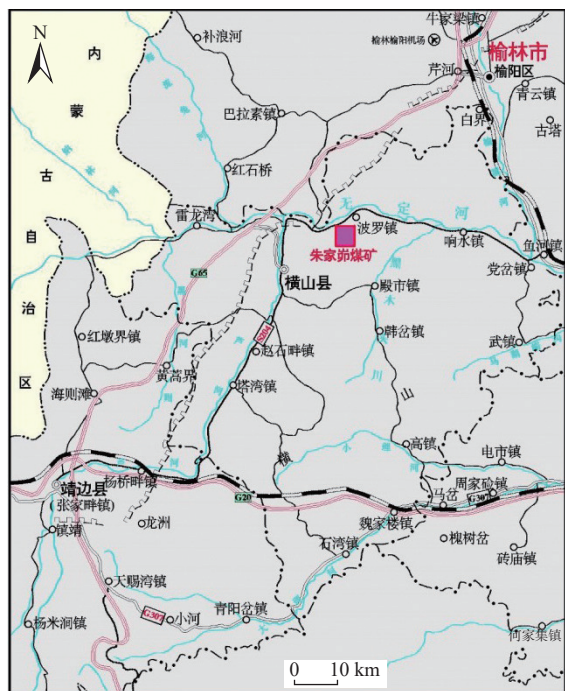


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location diagram of the research area

分为黄土梁峁区, 地势东、北部低, 西、南部高, 地形起伏较大, 支离破碎, 沟壑纵横。矿区东西宽约 5.2~10.0 km, 南北长为 4.7~5.3 km, 面积约为 50.193 2 km², 开采深度为 +1 000~+880 m。



a. 地裂缝; b. 滑坡



图2 采矿引发的地裂缝和不稳定边坡

Fig. 2 Ground cracks and unstable slopes caused by mining

(2) 土地损毁

土地损毁是矿山生产建设活动造成土地原有功能部分或完全丧失的过程, 包括土地挖损、塌陷、压占和污染 4 种损毁类型。煤矿开采对土地资源的损毁以压占损毁和塌陷损毁为主, 压占主要是工业场地、炸药库及矿山道路等地面建设工程对土地资源的压占; 塌陷损毁是地下煤层采出后, 发生地面下沉, 导致

煤矿设计生产规模为 4.0 Mt/a, 属大型煤矿。批准开采 3 号煤层, 采用斜井开拓全井田, 主、副斜井和风井均采用缓坡斜井, 主、副、回风 3 条斜井井筒及地面生产系统均集中布置在工业场地内。采用单一长壁综合机械化采煤法, 全部垮落法管理顶板, 单水平开拓标高 +962 m。

1.2 矿山生态问题

矿山生态环境问题与矿山开采方式、所在区域的自然地理背景和地质环境条件密切相关(徐友宁等, 2015)。黄土梁峁区煤炭地下开采会导致地表大面积塌陷、含(隔)水层结构破坏、地下水位下降、土地资源损毁, 对地表植被和建(构)筑物等造成严重影响, 不可避免地破坏区域生态环境。而且煤矿开采对地上地下的扰动影响剧烈、持续时间长, 造成的地质结构变化、含(隔)水层破坏和地下水位下降等问题修复难度大, 区域生态系统结构和功能恢复周期长(徐友宁等, 2001, 2005, 2015)。

(1) 地质安全隐患

由采矿活动引发或加剧的对人居、生命、财产安全构成威胁的危岩体、不稳定边坡、废弃矿井、地面塌陷、地表开裂等地质安全问题。生产煤矿存在的地质安全隐患主要包括采空地面塌陷以及由此引发的拉张裂缝和崩塌、滑坡等(图 2)。

地表变形开裂, 破坏土地资源。

(3) 水资源影响

煤矿开采对矿区地下水、地表水都将产生一定影响, 甚至较为剧烈, 地面塌陷会破坏含水层结构, 导致含水层疏干, 严重影响地下水资源, 进而使周边地表水和居民用水受到影响(徐友宁等, 2001)。

近年来, 陕北煤炭基地大规模、高强度的煤炭开

采,造成了窟野河流域萨拉乌苏组地下水位下降,部分区域下降幅度超过了 15 m,水位下降到基岩面以下,萨拉乌苏组已经被疏干,从而造成了萨拉乌苏组泉流量的衰减和干涸,窟野河基流量也因此衰减并断流(徐友宁等,2001)。

(4)生态退化

煤矿开采对生态的影响主要表现在对原始植被的破坏、水资源和表层土壤质地的破坏等,进一步造成生态系统结构破坏、功能衰退、生物多样性减少、生物生产力降低等。研究区地处风沙滩地区和黄土梁峁区的过渡地带,区域生态功能定位是水土保持和防风固沙,本次将植被覆盖度作为指示矿区生态功能变化的核心指标。

2 研究方法

2.1 数据源选择

以矿山生态问题为监测对象,根据不同遥感数据源的特点和优势,结合数据的可获取性,对本次监测采用的数据源进行了优选。Sentinel-1 数据能够全天候、全天时获取地面高程及形变信息,空间覆盖连续,重访周期 12 天,测量精度可达毫米级,适用于大范围、长时间序列地表形变的全方位动态监测。高分系列卫星遥感数据获取方便、成本低,适用于矿山土地损毁、植被状况、地表水分布等面上要素的监测。无人机航空摄影数据分辨率高,能够清晰反映地物的细微特征(吴松,2023),适用于地裂缝、崩塌、滑坡和不稳定边坡等点上要素的监测,同时作为卫星遥感数据的补充数据监测面上要素(表 1)。

2.2 数据获取与处理

2.2.1 Sentinel-1 数据

收集 2022 年 1 月 9 日至 2022 年 9 月 18 日共 14 景干涉测量宽幅模式(IW)的单视复数影像数据

(SLC),极化方式为 VV。DEM 数据采用由美国太空总署(NASA)和美国国防部国家测绘局(NIMA)联合测量的 SRTM-DEM 数据 SRTM3,水平分辨率为 30 m (1 arc-second)。轨道数据选取 POD 精密定轨星历数据,其定位精度小于 5 cm,是目前最为精确的轨道数据,可有效地去除干涉图中的平地相位。

为了同时获取监测期内月度和长时间序列地表形变信息,基于 GAMMA 软件,分别采用 D-InSAR 及 SBAS-InSAR 技术进行数据处理,处理流程见图 3 所示。

2.2.2 高分卫星遥感

共收集 GF-1 数据 2 景,时相分别为 2022 年 9 月 24 日和 2022 年 9 月 28 日,能够真实反映夏秋季节植被状况;GF-2 数据 1 景,时相为 2022 年 10 月 1 日。所有数据云雪量均小于 10%,影像层次丰富、纹理清晰、色调均匀、反差适中,满足研究需求。

利用 PCI、ENVI 和 Photoshop 等专业软件,对遥感影像进行数据预处理、配准、正射校正、图像融合、图像镶嵌裁剪等处理,并辅以反差增强、彩色变换增强及锐化增强等图像增强技术。平面坐标系采用 2000 国家大地坐标系,高斯-克吕格投影。1:5 000 比例尺按 3°分带,高程基准采用 1985 国家高程基准,正射纠正的高程控制采用 DEM 数据,制作的影像数据中误差不超过 1 m。

2.2.3 无人机航空摄影

针对近期采矿活动以及工业场地等人类活动剧烈区域,将井田北部划分为重点监测区,采用无人机航空摄影数据进行监测。采用大疆 M210 多旋翼无人机完成了 1:1 000 正射航拍,航向重叠度为 70%,旁向重叠度为 60%,各项指标均满足航摄规范要求。获取的原始影像分辨率为 7.91 cm,飞行面积 36.703 6 km²。飞行完成后,及时对数据质量进行了检查,确保拍摄影像纹理清晰、色彩丰富。作业时无人机上搭载有

表 1 遥感数据源一览表

Tab. 1 List of remote sensing data sources

数据类型	数据源	空间分辨率(m)	特点及用途
合成孔径雷达	Sentinel-1	5×20	全天候、全天时、空间覆盖连续,用于监测地面塌陷范围及沉降量
高分卫星遥感	GF-1	2	获取方便、成本低,GF-1主要用于监测植被状况,GF-2用于监测地表水体、土地损毁范围和程度等
	GF-2	0.8	
无人机遥感	1:1 000航空摄影	0.1	分辨率高,灵活机动,主要用于监测地裂缝、崩塌、滑坡和不稳定边坡等点上要素

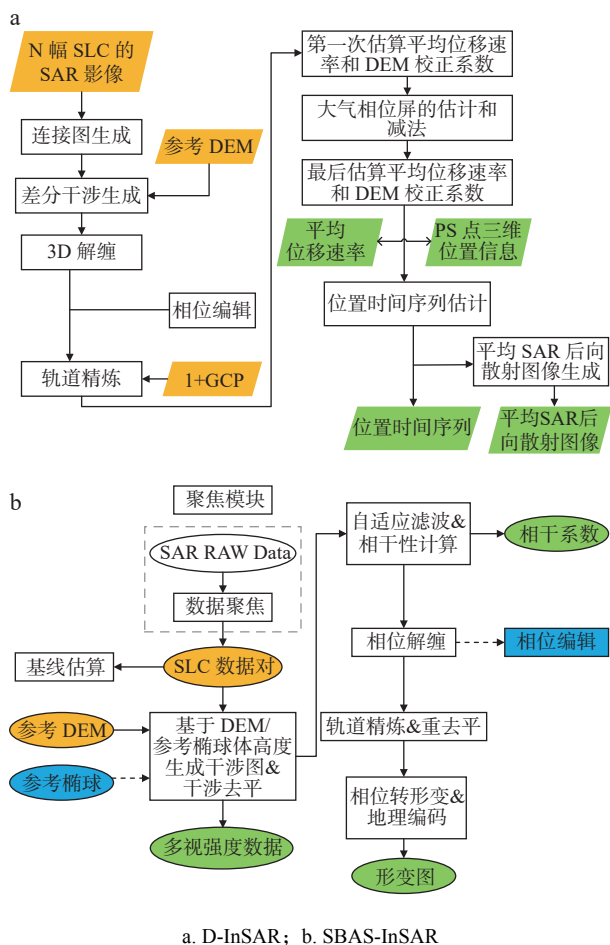


图3 数据处理流程(引自《SARscape 产品白皮书——2022年》)

Fig. 3 Data processing flow

GPS 模块, 可以准确进行定位, 保证数据处理的精度。利用 Pix4Dmapper Pro 软件对原始数据进行处理, 平面精度误差在 0.1 m 以内, 得到高精度正射影像(DOM)和数字表面模型(DSM)。

2.3 信息提取

地质安全隐患、土地损毁和地表水体进行人机交

互解译, 解译时采用全分辨率解译, 面状要素最小上图精度为 4 mm^2 。植被状况通过计算研究区 NDVI 指数和植被覆盖度(FVC)进行监测, 通过多年度相近时相 NDVI 指数对比, 能够进一步监测矿区生态状况的变化趋势和内在规律。

(1) 地质安全隐患

地裂缝使得地表浅层土壤结构发生了变化, 在遥感影像上常形成色调和纹理上的光谱差异, 呈线状影像特征, 解译标志明显; 崩塌和滑坡在后壁存在无植被区, 与周围有明显差异, 滑坡后缘多呈圈椅状, 多存在明显裂缝, 崩塌下方常有崩积物(图4)。对地质安全隐患的解译需要结合煤矿开采的相关资料进行综合判别。

(2) 土地损毁

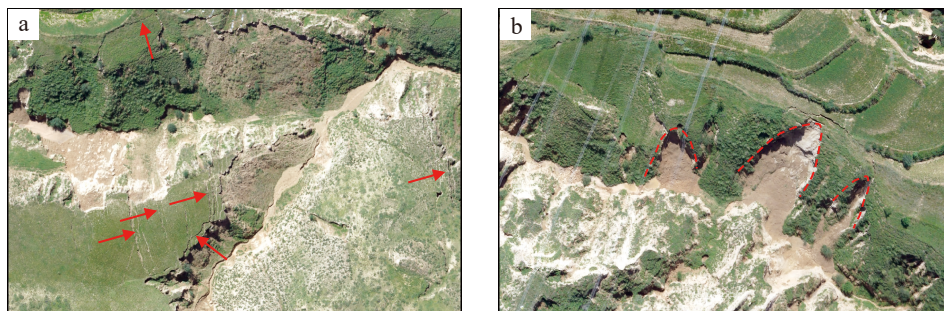
土地损毁包括压占损毁和塌陷损毁两类, 压占损毁程度依据对表土层和植被的破坏情况进行划分。仅破坏了原始植被, 表土层未破坏, 划分为轻度损毁; 破坏了原始植被, 表土层部分破坏, 划分为中度损毁; 原始植被和表土层均已破坏, 划分为重度损毁。塌陷损毁程度依据塌陷时间和地裂缝发育情况进行综合评判, 已经达到沉稳状态、且地裂缝不发育的区域划分为轻度损毁, 未达到沉稳状态、地裂缝较发育的区域划分为中度损毁, 解译标志见图5。

(3) 地表水

通过人机交互提取研究区地表水体的数量、面积和空间分布。未来可通过改进遥感数据源、加强水体边界混合像元分析及细小水体精细提取方法等进一步提高地表水体的提取效率和精度(韩亚超等, 2022), 解译标志见图6。

(4) 植被状况

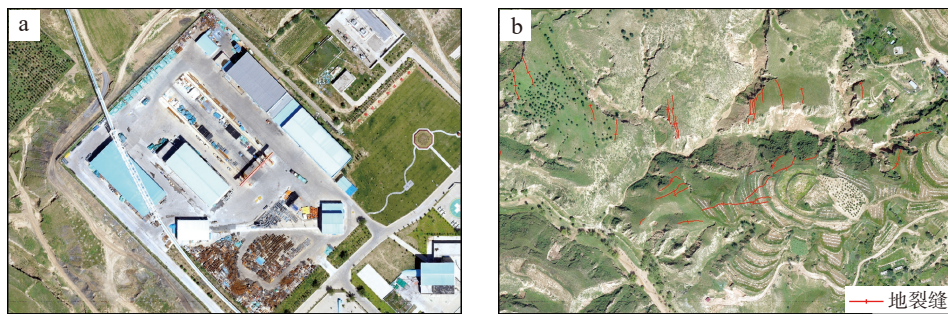
基于植被 NDVI 模型与 GF-1 遥感影像, 利用 ENVI 软件平台的 Band Algebra 模块的 Band Math 工具,



a. 地裂缝; b. 黄土崩塌

图4 地质安全隐患遥感解译标志(数据源: 无人机正射影像)

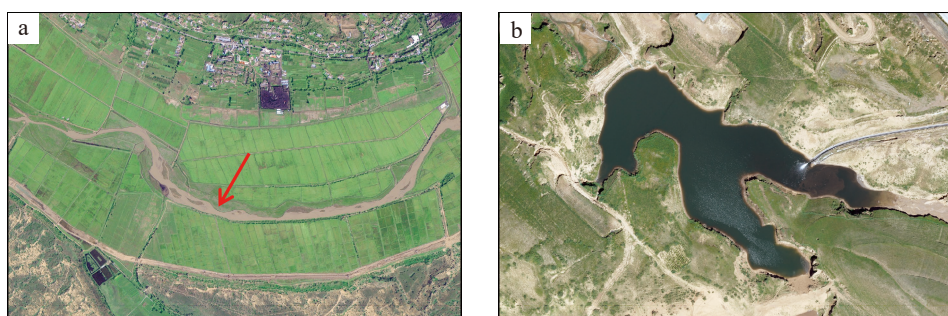
Fig. 4 Remote sensing interpretation of geological safety hazards



a. 压占损毁; b. 塌陷损毁

图5 土地损毁遥感解译标志(数据源:GF-2)

Fig. 5 Remote Sensing interpretation sign of land damage (Data source: GF-2)



a. 河流; b. 水库

图6 地表水体遥感解译标志(数据源:GF-2)

Fig. 6 Surface water interpretation markers (Data source: GF-2)

计算研究区植被覆盖度指标。 $NDVI$ 计算公式如下(苗旭等, 2022):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

式中: NIR 为近红外波段; R 为可见光红波段; $NDVI$ 值介于 $[-1, 1]$ 之间。

混合像元的 $NDVI$ 值是植被覆盖部分和非植被覆盖部分 $NDVI$ 值的线性加权值, 利用植被覆盖度与归一化植被指数之间存在的显著相关性, 结合 FVC 进行计算, 计算公式为(苗旭等, 2022):

$$FVC = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (2)$$

式中: FVC 为植被覆盖度; $NDVI_{min}$ 为裸土或没有植被覆盖的像元值(取累积概率为 5% 的 $NDVI$ 值); $NDVI_{max}$ 为完全被植被覆盖的像元值(取累积概率为 95% 的 $NDVI$ 值)。

3 结果与分析

3.1 地质安全隐患

3.1.1 空间分布及表现形式

通过遥感解译, 结合煤矿相关资料, 目前仍处于

形变期的地面塌陷共两处, 分别为研究区西部三盘区的 TX1 和东部一盘区的 TX2。

TX1 形成时间为 2017~2022 年, 塌陷面积 3.717 2 km²。由于塌陷范围较大, 部分区域仍处于形变期, 塌陷范围内发育的地裂缝和崩塌、滑坡较多。遥感解译结果显示, 共发育 82 条地裂缝、14 处滑坡和 74 处崩塌, 绝大多数没有威胁对象, 有少数崩塌、滑坡可能造成下游河道堵塞, 暂时不会威胁居民生命财产安全。地裂缝走向以 NNW、NEE 和 NNE 为主, 地裂缝宽度约 10~50 cm, 裂缝长度从 5 m 到 100 m 不等。

TX2 形成时间为 2021 年 10 月~2022 年 12 月, 仍处于形变当中, 尚未沉稳, 塌陷面积 0.690 8 km²。塌陷区北部位于风沙滩地区, 裂缝不发育, 南部由于开采时间较晚, 裂缝尚未大规模形成。遥感解译结果显示, 塌陷范围内共发育 4 处滑坡和 14 处崩塌, 均为小型、土质, 无威胁对象。由于尚未达到沉稳期, 后期地裂缝和崩塌、滑坡存在进一步增加的可能, 对村民正常生产生活存在一定的威胁。

3.1.2 地表形变规律

(1) 逐月地表形变量

利用 D-InSAR 技术提取了 1~9 月的逐月地表形

变信息(表 2)。研究区主要存在两处形变区, 一处对应矿区西部三盘区正在开采的工作面(即 TX1), 另一处对应矿区东部一盘区正在开采的工作面(即 TX2)。

表 2 月度形变信息
Tab. 2 Monthly deformation information

月份	SAR成像时间	影像间隔时间(d)	A区域最大形变量(m)	B区域最大形变量(m)
1	20220109_20220202	24	-0.025	-0.041
2	20220202_20220226	24	-0.030	-0.045
3	20220226_20220403	36	-0.039	-0.046
4	20220403_20220427	24	-0.031	-0.039
5	20220427_20220602	36	-0.059	-0.041
6~7	20220602_20220801	60	-0.030	-0.049
8~9	20220801_20220918	48	-0.044	-0.028

TX1 形变区在 1~5 月期间仅有 1 处明显的形变点, 形变位置、范围由西向东发生推移, 与工作面推进方向一致; 6~7 月共计 4 处形变点, 原有 1 处的形变程度明显减弱, 相较 1~5 月新增了 3 处形变点; 8~9 月 A 形变区主要表现为两处形变点, 较 6~7 月减少了两处, 推测两处形变在该时期内地表已基本稳定。

TX2 形变区在 1~5 月期间主要存在 1 处形变点, 形变位置、范围由北向南发生推移, 与工作面推进方向一致; 6~7 月形变影响范围扩大, 8~9 月相较 1~7 月的形变程度明显减弱。

(2) 长时间序列地表形变量

利用 SBAS-InSAR 技术获取了研究区雷达垂直向

的年平均形变速率(图 7)及累积形变量(图 8)。可以看出, 在 2022 年 1~9 月期间, 研究区出现明显形变, A 形变区(TX1)最大形变速率为-0.086 m/a, 最大累积形变量为-0.057 m; B 形变区(TX2)最大形变速率为-0.110 m/a, 最大累积形变量为-0.084 m, 形变区域与开采工作面相一致。

根据形变区域的形变位置和量级, 以形变程度最强烈的 XB004(TX2 所在位置)为例, 沿工作面走向绘制剖面线, 分析工作面走向时间序列形变规律, 进一步选择剖面线上形变速率较大的特征点(SX004), 分析特征点的持续形变情况。XB004 形变区的 InSAR、光学影像及等值线图见图 9, 工作面走向剖面线及特征点时

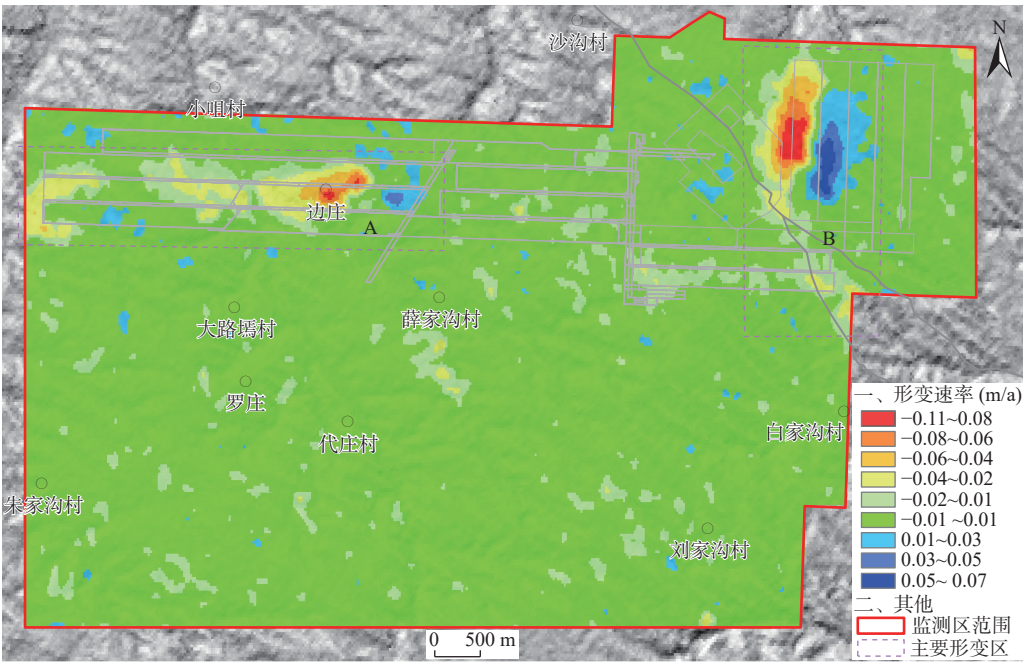


图7 形变速率图(20220109~20220918)
Fig. 7 Deformation rate diagram

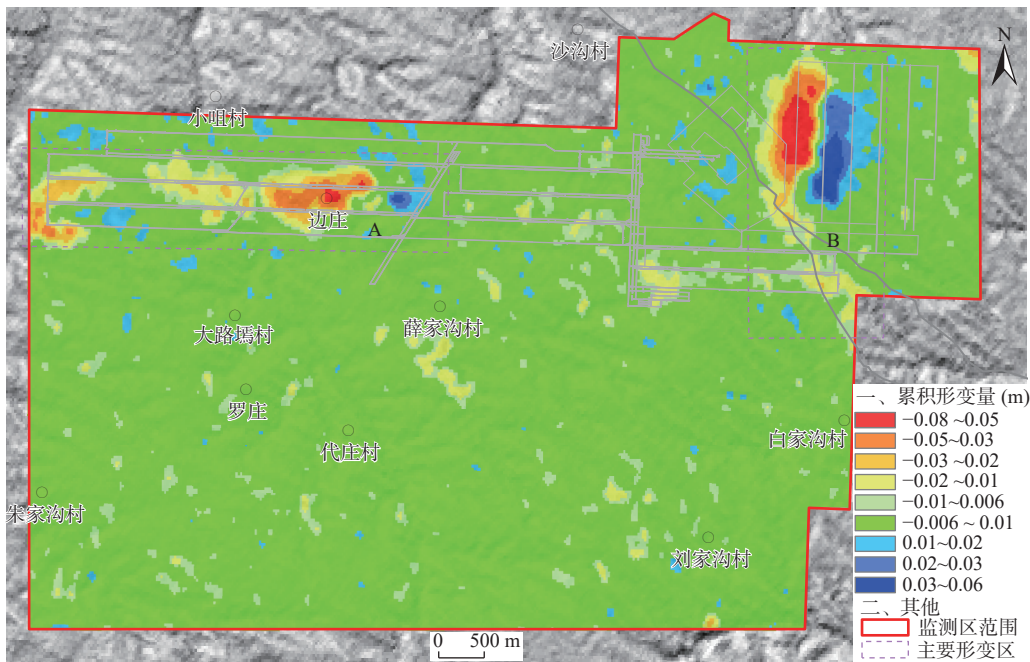


图8 累积形变量图(20220109~20220918)
Fig. 8 Cumulative shape variable chart

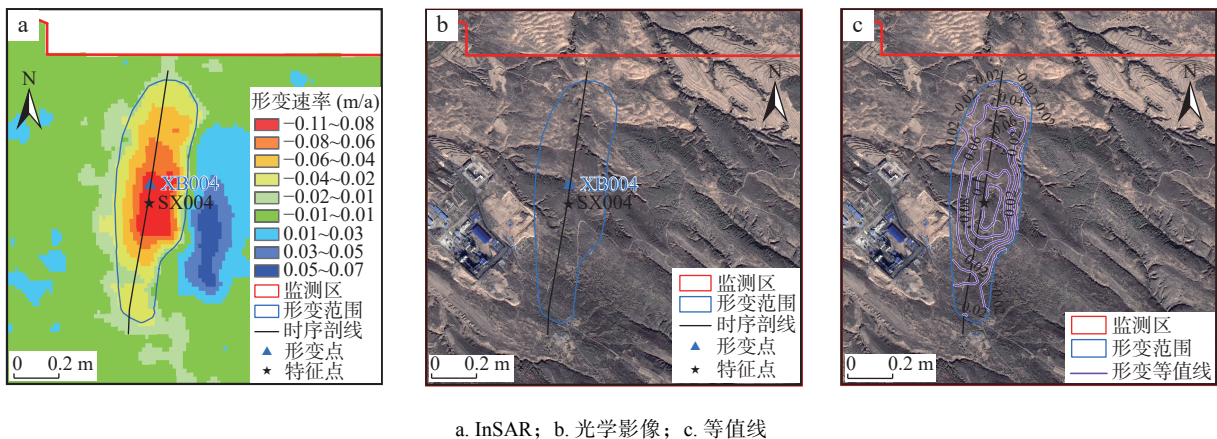


图9 XB004 形变区的 InSAR、光学影像及等值线图

Fig. 9 InSAR, optical image and contour map of the deformation region of XB004

序剖面见图 10。

由图 10 可知, 2022 年 1~9 月期间, SX004 特征点的最大形变速率约为 -0.099 m/a , 形变程度属于极明显级别, 表明形变非常大。等值线图可对沉降漏斗进行精确定位, 掌握形变区不同位置形变大小, 等值线越密集表明形变速率变化越大, 反之形变速率变化越小(郑志琴, 2015; 李诗雨, 2022), XB004 形变等值线由外向内依次为 -0.02 m 、 -0.04 m 、 -0.06 m 、 -0.08 m 、 -0.1 m , 沉降中心东侧等值线较密集, 说明该处形变速率变化较大。在工作面走向时序剖线上, 沉降中心形变量最大, 两边形变量较小, 形成明显的沉降漏斗, SX004 特征点的最大累积形变量约 -0.074 m/a 。

整体上, SX004 特征点仅在 2022 年 4 月 1 日~2022 年 5 月 15 日期间形变速率轻微波动, 随着时间推移, 形变量不断增加, 形变速率有持续增大趋势。

3.2 土地损毁

损毁类型包括压占损毁和塌陷损毁两类。压占主要是工业场地、炸药库及矿山道路等地面建设工程对土地的压占, 损毁面积 $326\,257\text{ m}^2$, 以重度为主; 塌陷损毁是地下煤层采出后, 发生地面下沉, 导致地表变形开裂, 破坏土地资源, 损毁面积 $6\,152\,139\text{ m}^2$, 以中度和轻度为主(图 11)。

3.3 水资源影响

遥感技术主要侧重于监测地表水体的变化。监测

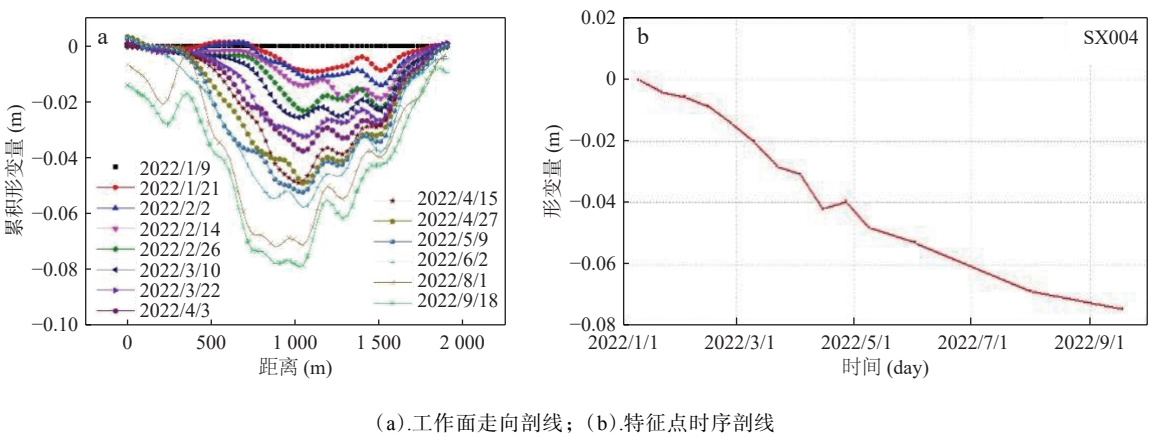


图10 XB004 形变区工作面走向剖面及特征点时序剖面

Fig. 10 XB004 deformation zone working face strike profile and feature point time series profile

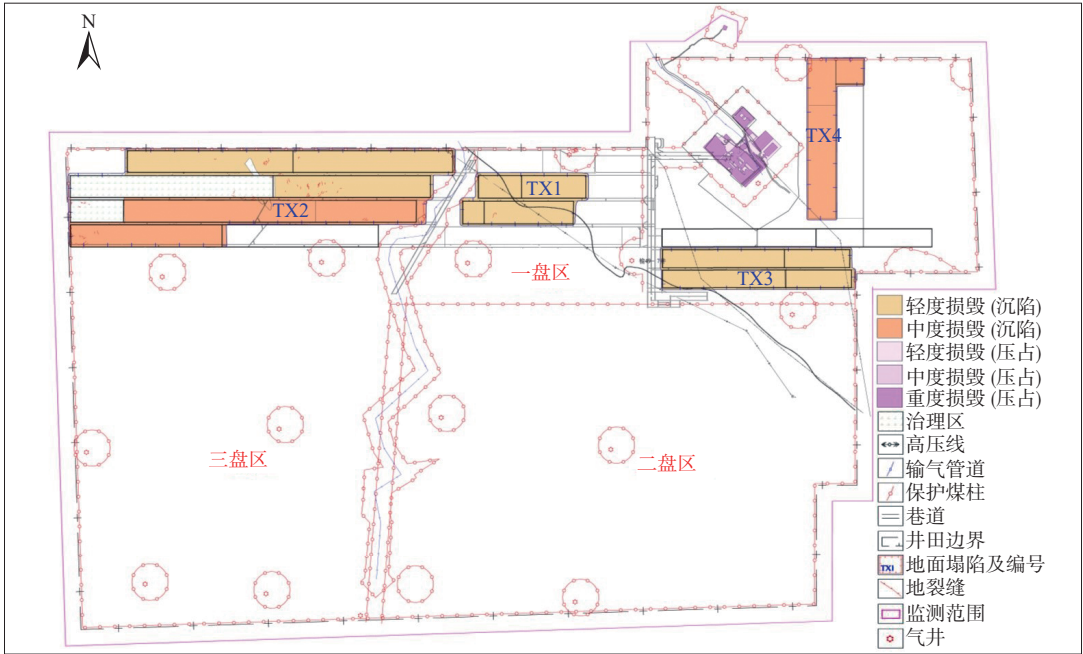


图11 研究区土地损毁现状图

Fig. 11 Land damage status in the study area

结果显示,研究区有 4 处地表水体,空间分布较为集中,主要分布在工业场地的西北侧及西南侧,面积从大到小依次为 23 400 m²、19 900 m²、156 000 m²、12 700 m²,总面积共 71 600 m²。高分卫星遥感和无人机遥感技术能够对矿区地表水体数量及面积进行全方位监测,多期影像对比则可以反映出地表水体的变化情况。

3.4 生态退化

监测结果显示,研究区植被状况总体较好,以中等覆盖度和较高覆盖度为主,其他均为零星分布。中等覆盖度主要包括耕地、园地和稀疏的林地等,较高覆盖度主要包括各类林地和天然牧草地等。随着煤矿的持续开采,短期仍然会对植被产生影响(表 3,图 12)。

表 3 植被覆盖度分级统计情况

Tab. 3 Vegetation coverage classification statistics

序号	分级	植被覆盖度 (%)	面积 (hm ²)	比例 (%)
1	高覆盖度	≥70	0.012 6	0
2	较高覆盖度	50~70	1 483.08	26.41
3	中等覆盖度	30~50	3 913.307	69.70
4	较低覆盖度	10~30	1.421 7	0.03
5	低覆盖度	< 10	0.021 5	0
建设用地、水体			216.921 4	3.86
合计			5 614.764 2	100

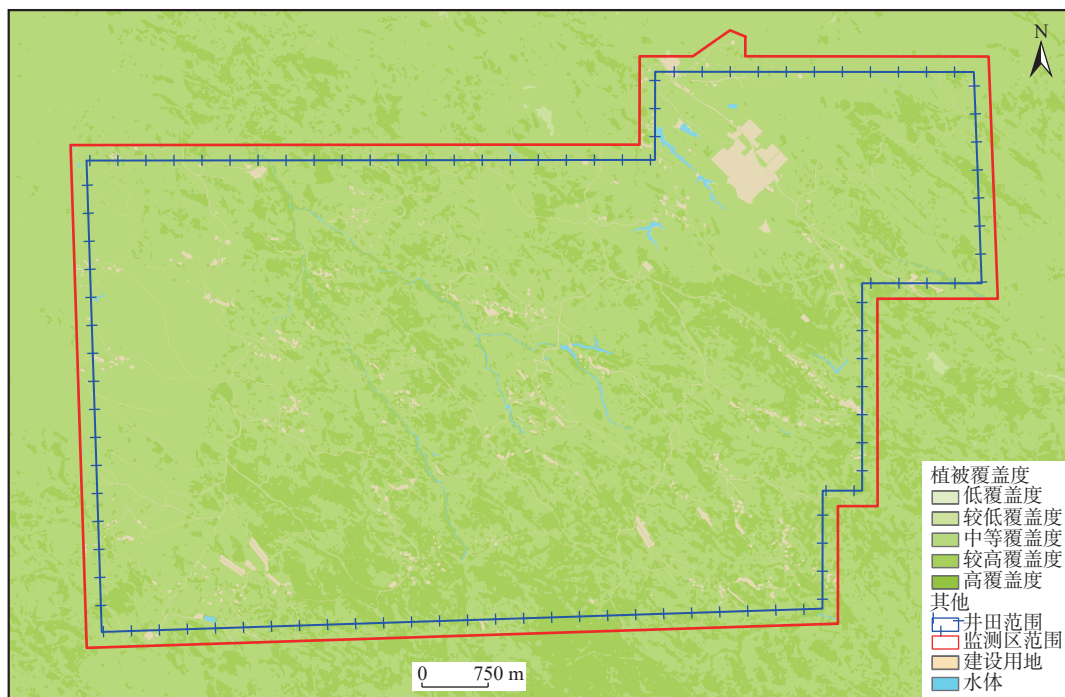


图12 研究区植被覆盖度图

Fig. 12 Vegetation coverage in the study area

4 结论与展望

(1)多源遥感技术具有全局性、宏观性和可追溯性,在矿山生态环境监测中具有无可比拟的优势,应用效果较好。此外,遥感技术受人为因素影响较小,成本较低,目前已成为矿山生态环境监测的重要手段之一。

(2)针对不同的监测对象和要素,采用全面布控和重点监测相结合的原则,基于星机载多光谱和星载极化干涉 SAR 技术,构建了空-天协同的矿山遥感监测技术体系,实现了矿山生态环境多尺度、连续性、整体性监测和多要素信息协同监测的目标。

(3)Sentinel-1 数据是 InSAR 监测中最常用的数据源,但受限于其精度不高和数据缺失等问题,在本次地表形变监测中应用效果不够理想,在后期开展矿山监测时,在考虑经济可行性的前提下,可以选择 RADARSAT-2、ALOS-2 和 TerraSAR-X 等精度更高的数据源。

(4)针对存在煤火隐患的矿山,除文中提到的 3 种常用遥感数据源外,可以采用热红外遥感测量技术对地表温度进行反演,圈定高温异常区,及时发现煤层着火点或煤层自燃隐患,采取相应措施。热红外数据源在矿山生态环境监测中同样具有较好的应用效果和前景。

(5)遥感技术有其自身的局限性,可以与物联网、现场监测等技术手段联合应用,构建空地深一体化立体监测体系。未来,在现有矿山生态环境监测技术手段的基础上,充分发挥 AI、大数据、机器学习等技术优势,通过新的智能算法及模型对海量遥感数据进行处理、分析和信息挖掘等进行有效利用,构建“多网融合+实时监测+智能作业+任务协同+全面感知+自主决策”的矿区智能生态环境监测预警体系(陈国良等, 2023),大幅提升矿区生态环境智能监测及预警水平。

参考文献(References):

- 陈国良,时洪涛,汪云甲,等. 矿山地质环境“天—空—地—人”协同监测与多要素智能感知[J]. 金属矿山, 2023(1): 9–16.
- CHEN Guoliang, SHI Hongtao, WANG Yunjia, et al. Integrated Space-Air-Ground-Human Monitoring and Multiple Parameters Intelligence Sensing of Mine Geological Environment[J]. Metal Mine, 2023(1): 9–16.
- 范立民. 论矿山地质环境监测体系[J]. 陕西地质, 2017, 35(1): 61–64.
- FAN Limin. Monitoring System of Mining Geo-Environment[J]. Geology of Shaanxi, 2017, 35(1): 61–64.
- 高俊华,邹联学,龙欢,等. 基于遥感动态监测的吉林省矿山地质环境及生态修复变化特征分析[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(3): 240–248.
- GAO Junhua, ZOU Lianxue, LONG Huan, et al. Analysis on characteristics of mine geological environment and ecological restoration changes in Jilin Province based on dynamic remote sensing

- monitoring[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2022, 34(3): 240–248.
- 黄登冕, 张聪, 姚晓军, 等. 矿山环境遥感监测研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2022, 37(5): 1043–1055.
- HUANG Dengmian, ZHANG Cong, YAO Xiaojun, et al. Research Progress of Mine Environment Remote Sensing Monitoring[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, 37(5): 1043–1055.
- 韩海辉, 王艺霖, 任广利, 等. 几种高光谱分析法在蚀变矿物信息提取中的对比分析——以北山老金厂为例[J]. *西北地质*, 2020, 53(4): 223–234.
- HAN Haihui, WANG Yilin, REN Guangli, et al. A Comparative Analysis of Several Hyperspectral Methods in the Extraction of Altered Minerals: A Case Study of Laojinchang in Beishan Area[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(4): 223–234.
- 韩海辉, 李健强, 易欢, 等. 遥感技术在西北地质调查中的应用及展望[J]. *西北地质*, 2022a, 55(3): 155–169.
- HAN Haihui, LI Jianqiang, YI Huan, et al. Application and Prospect of Remote Sensing Technology in Geological Survey of Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2022a, 55(3): 155–169.
- 韩海辉, 张转, 任广利, 等. 一种快速识别基性—超基性岩的新方法——基性度遥感指数法[J]. *西北地质*, 2022b, 55(2): 71–81.
- HAN Haihui, ZHANG Zhuan, REN Guangli, et al. A New Method for Fast Identification of Basic—ultrabasic Rocks—Basic Degree Index from Remote Sensing Image[J]. *Northwestern Geology*, 2022b, 55(2): 71–81.
- 韩亚超, 高子弘, 杨达昌, 等. 我国城市水体数量与质量遥感调查应用现状与建议[J]. *城市地质*, 2022, 17(4): 485–492.
- HAN Yachao, GAO Zihong, YANG Dachang, et al. Review and suggestions of remote sensing survey of urban water bodies quantity and quality in our country[J]. *Urban Geology*, 2022, 17(4): 485–492.
- 廉旭刚, 韩雨, 刘晓宇, 等. 无人机低空遥感矿山地质灾害监测研究进展及发展趋势[J]. *金属矿山*, 2023(1): 17–29.
- LIAN Xugang, HAN Yu, LIU Xiaoyu, et al. Study Progress and Development Trend of Mine Geological Disaster Monitoring by UAV Low-altitude Remote Sensing[J]. *Metal Mine*, 2023(1): 17–29.
- 蔺楠, 陈莹, 马露, 等. 陕北煤炭基地矿山生态修复成效评估体系构建与实现[J]. *西北地质*, 2023, 56(3): 89–97.
- LIN Nan, CHEN Ying, MA Lu, et al. Construction and Implementation of Evaluation System for Ecological Restoration Effectiveness of Mines in Northern Shaanxi Coal Base[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 89–97.
- 李诗雨. 基于长时序 InSAR 的金属矿山地表形变监测技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- LI Shiyu. Research on Surface Deformation Monitoring Technology of Metal Mines based on Long-Time-Series InSAR[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- 苗旭, 李九一, 宋小燕等. 2000–2020 年鄂尔多斯市植被 NDVI 变化格局及归因分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(3): 300–305.
- MIAO Xu, LI Jiuyi, SONG Xiaoyan, et al. Analysis on Change Pattern and Attribution of Vegetation NDVI in Ordos City from 2000 to 2020[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(3): 300–305.
- 王凤娟. 论遥感影像在矿山地质环境监测治理方面的应用[J]. *世界有色金属*, 2020(12): 264–265.
- WANG Fengjuan. Discussion on the application of remote sensing image in mine geological environment monitoring and treatment[J]. *World Nonferrous Metals*, 2020(12): 264–265.
- 吴松. 无人机航空摄影测量在矿山动态监测中的应用[J]. *能源与节能*, 2023(2): 173–176.
- WU Song. Application of UAV Aerial Photogrammetry in Mine Dynamic Monitoring[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2023(2): 173–176.
- 徐友宁, 武征, 赵子长. 西北地区矿产资源开发的环境地质问题及其类型[J]. *西北地质*, 2001, 34(2): 28–33.
- XU Youning, WU Zheng, ZHAO Zichang. The Problems of Environmental Geology and Database for Mining in Northwestern China[J]. *Northwestern Geology*, 2001, 34(2): 28–33.
- 徐友宁. 矿山环境地质与地质环境[J]. *西北地质*, 2005, 38(4): 108–112.
- XU Youning. Mine Environmental geology and geological environment[J]. *Northwestern Geology*, 2005, 38(4): 108–112.
- 徐友宁, 李玉武, 张江华, 等. 宁夏石嘴山采煤塌陷区地质环境治理模式研究[J]. *西北地质*, 2015, 48(4): 183–189.
- XU Youning, LI Yuwu, ZHANG Jianghua, et al. Treatment Model on Geo-Environment in the Coal Mine Collapse Area of Shizuishan City, Ningxia[J]. *Northwestern Geology*, 2015, 48(4): 183–189.
- 徐友宁, 张江华, 何芳, 等. 西北地区矿山地质环境调查与防治研究[J]. *西北地质*, 2022, 55(3): 129–139.
- XU Youning, ZHANG Jianghua, HE Fang, et al. Investigation and Preventive Research of Mine Geological Environment in Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 129–139.
- 杨金中, 聂洪峰, 荆青青. 初论全国矿山地质环境现状与存在问题[J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(2): 1–7.
- YANG Jinzhong, NIE Hongfeng, JING Qingqing. Preliminary analysis of mine geo-environment status and existing problems in China[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2017, 29(2): 1–7.
- 郑志琴. 基于 D-InSAR 技术的矿区地表沉陷监测及其数据处理研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2015.
- ZHENG Zhiqin. Surface Subsidence Monitoring and Data Processing Research of Mining Area Based on D-InSAR Technology[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2015.
- Chen W, Li X, He H. A review of fine-scale land use and land cover classification in open-pit mining areas by re-mote sensing techniques[J]. *Remote Sensing*, 2017, 10(2): 10010015–10010033.
- Gallwey J, Robiati C, Coggan J, et al. A Sentinel-2 based multispectral convolutional neural network for detecting arti-sanal small-scale mining in Ghana: Applying deep learning to shallow mining[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 248: 111970–111984.
- Johansen K, Erskine P, McCabe M. Using unmanned aerial vehicles to assess the rehabilitation performance of open cut coal mines[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209: 819–833.
- Li L, Zhang R, Sun J, et al. Monitoring and prediction of dust concentration in an open-pit mine using a deep-learning algorithm[J]. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2021, 19(1): 401–414.