

doi: 10.6046/zrzyg.2021195

引用格式: 杨显华, 魏鹏, 吕军, 等. 基于多源遥感的采空塌陷识别技术应用研究[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(2): 162–167.
(Yang X H, Wei P, Lyu J, et al. Application of mining collapse recognition technology based on multi-source remote sensing[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(2): 162–167.)

基于多源遥感的采空塌陷识别技术应用研究

杨显华¹, 魏鹏², 吕军³, 韩磊¹, 石浩林¹, 刘智¹

(1. 四川省地质调查院稀有稀土战略资源评价与利用四川省重点实验室, 成都 610081;

2. 四川省国土空间生态修复与地质灾害防治研究院, 成都 610081;

3. 成都市新津区宝墩镇人民政府, 成都 611438)

摘要: 矿山开发导致的采空塌陷会造成土壤、植被、水资源损毁; 随着国家实施生态修复战略, 有效识别、监控采空塌陷区显得意义重大。为此, 利用多源高分辨率光学影像和 Sentinel-1 SAR 雷达影像, 采用 Stacking InSAR 地面沉降信息提取和光学影像采空塌陷人机交互解译方式, 分别对甘肃白银某煤矿区采空塌陷实施了识别、监测; 综合对比分析了各自技术特点, 并探讨在生态修复工程部署中的应用前景。研究结果表明: ① Stacking InSAR 雷达监测技术能更好反映监测期内形变信息, 对于浅部、中部、深部煤层的采空塌陷区均能有效识别; ② 高分辨率光学影像则对浅部、中部煤层的采空塌陷区能较好识别, 能更为精准识别损毁土地情况, 对目前塌陷形变已停止、历史上形成的采空塌陷区及损毁土地情况有很好的识别能力; ③ 综合 InSAR 雷达监测技术和高分辨率光学影像遥感识别方法, 能全面获取各阶段采空塌陷形变及损毁土地情况, 可为生态修复工程提供翔实可靠的基础数据。

关键词: 采空塌陷; 高分辨率光学影像; Stacking InSAR; Sentinel-1; 生态修复

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)02-0162-06

0 引言

我国采空塌陷多由煤、铁、铅锌、金等矿山地下开采引发, 产生了较严重的土壤、植被、水资源损毁, 由采空塌陷造成的土地损毁面积甚至大于采矿直接压占和损毁土地面积^[1]。据国家主管部门介绍, 全国每年因采煤而塌陷的土地就达 70 km², 每年造成直接经济损失达几十亿元^[2]。近年来, 国家实施了长江经济带、黄河流域等生态修复战略^[3], 推进矿业城市绿色转型发展^[4]。如何有效识别采空塌陷区, 掌握其分布及演变趋势, 实施精准防护管控和修复治理, 具有重要意义。

无论传统的大地测量技术还是高精度全球定位技术, 均难以对矿区采空塌陷进行全面识别、监测。利用多期高分辨率光学影像, 可大范围、周期性、高空间分辨率获取采空塌陷区分布现状和变化信息, 是一种经济、便捷的采空塌陷遥感识别手段^[5-9]。

合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic

Aperture Radar, InSAR) 技术以其全天时、全天候、大覆盖、高精度以及周期性观测等特点, 成为空间对地观测的有效手段; 叠加 InSAR (Stacking InSAR) 技术已被证实有利于对井田范围较大的矿区进行沉降监测, 适用于沉降速率较快且存档数据较少的情况^[10-14]。目前, 对于利用高分辨率光学影像和 InSAR 雷达影像在采空塌陷区监测中的综合应用研究尚少, 对采空塌陷的遥感识别技术缺乏系统分析、对比和总结。

本文拟选择煤矿开采引发采空塌陷问题较突出的甘肃白银王家山一大水头煤矿区, 分别利用多期高分辨率光学影像和 Sentinel-1 SAR 雷达影像, 对采空塌陷区进行遥感识别; 综合对比、分析识别结果, 总结各自的技术特点和优势, 并探讨在采空塌陷区生态修复工程中的应用前景。

1 研究区概况

近年来, 随着黄河流域生态保护和高质量发展

收稿日期: 2021-06-22; 修订日期: 2021-11-05

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“全国矿山环境恢复治理状况遥感地质调查与监测”(编号: DD20190705)、“西北等地区新增恢复治理遥感增值产品采购”(编号: 2021193)和“四川省矿产资源开发环境遥感监测”(编号: 12120115061801)共同资助。

第一作者: 杨显华(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事遥感地质、生态环境评价研究等工作。Email: 170219994@qq.com。

战略的实施,国家重点对流域内环境影响突出的煤矿区实施生态保护修复,研究区地处黄河流域甘肃省白银市王家山—大水头煤矿,属黄土高原中海拔黄土梁峁地貌,地处干旱、半干旱气候带,煤矿开采历史悠久,规模大,以地下开采为主。区域内含煤地层为侏罗系窑街组(J_2y),共含煤层4层;其次为中侏罗统新河组(Jx)地层。主要由灰白色中、粗粒砂岩,灰、深灰、灰黑色粉砂岩、砂质泥岩及煤层组成。研究区内断裂30余条,含煤地层以NW—SE向展布为主,与构造方向基本一致。区内煤矿已开采40余年,大型煤矿地下开拓与采掘及小煤窑的乱挖,加之黄土地貌的松散性、多孔性、湿陷性特点和活动断裂发育的构造背景,区内采煤引发的地裂缝、塌陷坑等损毁土地问题极其突出,前人对煤矿采空塌陷形成机理、灾害链等实施了大量研究,但对灾害隐患状态、演变趋势、修复保护措施等研究探讨较少^[15]。

2 Sentinel-1A SAR 雷达影像监测

2.1 Sentinel-1 数据

哨兵1号(Sentinel-1A)卫星于2014年4月成功发射,是欧洲航天局(European Space Agency, ESA)和欧洲委员会(European Commission, EC)针对全球环境与安全监测系统项目,即欧洲航天局哥白尼计划(Global Monitoring for Environment and Security, GMES)而共同研发的地球观测卫星^[16];是ESA哨兵系列发射的首颗雷达成像,可提供连续图像(白天、夜晚和各种天气)。Sentinel-1A卫星的工作模式有条带模式(Strip Map, SM)、干涉宽幅模式(Interferometric Wide Swath, IW)、波模式(Wave, WV)和额外宽幅(Extra Wide Swath, EW)模式4种,幅宽分别为80 km, 250 km, 100 km和400 km,分辨率分别为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$, $5\text{ m} \times 20\text{ m}$, $5\text{ m} \times 20\text{ m}$ 和 $20\text{ m} \times 40\text{ m}$ 。Sentinel-1A雷达卫星的主要任务是监测冰川海洋、地表形变、生态环境、水体管理和土壤保护。

获取了研究区2019年1月4日至2019年12月30日的31景Sentinel-1A雷达影像。

2.2 Stacking InSAR 技术原理

Stacking InSAR技术由是将多幅解缠后的差分干涉相位图进行线性叠加,以最大程度地减少大气误差、提高形变测量精度的一种方法。该技术基于多景影像解决常规InSAR面临的干涉失相干和大气延迟的问题,对影像数量和相干性要求不太严苛,适用于矿区沉降速率较快、难以获得稳定高相干点的情况。主要数据处理流程如图1。

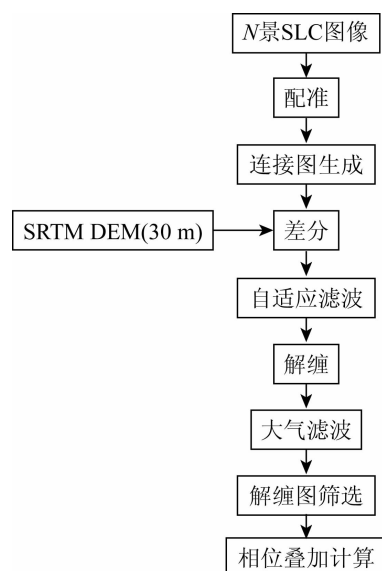


图1 Stacking 技术流程图

Fig. 1 Flow chart of Stacking technology

首先对获取的研究区2019年全年度31期哨兵1号卫星单视复数(SLC)影像进行配准。设置合适的时间基线和空间基线,进行构网连接。引入SRTM DEM(30 m)数据进行地形去除,并采用自适应滤波提高干涉图像的信噪比和相干性。采用最小费用流(MCF)算法对滤波后的差分图进行解缠。针对大气水汽误差采用趋势性滤波进行抑制。因研究区地处北方干燥区域,全年降雨很少,受大气水汽影响较小,故本文采用人工筛选的方法剔除大气误差明显的相对剩余的解缠图进行加权叠加处理,获得研究区平均相位变化速率和形变速率。

2.3 地表形变信息提取结果

利用Stacking InSAR技术获取了研究区2019年1—12月期间地表形变情况,区域相位变化和形变量如图2所示。Stacking InSAR技术对于区域地面沉降、地表形变现象具有精确的识别能力,而矿山地下开采对地球表面和岩石圈的自然平衡造成了强烈扰动,通常形成小范围陡崖式的地面沉降/形变区块,采空塌陷多位于沉降速率突出的沉降区/形变中心。将研究区正、负形变(沉降)速率按绝对值统一归并,并根据采矿权范围、矿山开发利用等矿山开发利用影像区域指示数据,删除非采煤引发的干扰信息(因保密规定,未将采矿权信息等数据在本文中展示),准确、清晰获取了采空塌陷形变状况信息。研究区监测形变面积 $3\,036\text{ hm}^2$,年均最大形变量达 183.24 mm ,年均形变量在 20 mm 以上区域均分布于采矿权范围之内,均有煤矿井工开采作业。年均形变量低于 20 mm 区域主要分布于采矿权周边。

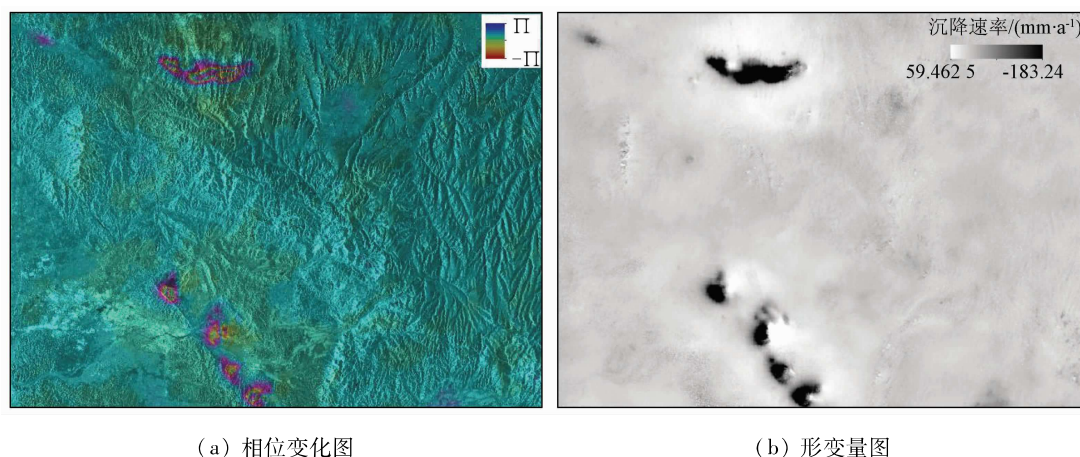


图 2 Stacking InSAR 形变识别

Fig. 2 Deformation recognition by Stacking InSAR

3 高分辨率光学影像遥感识别

利用 2019 年分辨率优于 1 m 的遥感数据 (GF2) 和无人机航拍影像 (分辨率优于 0.2 m), 对采煤塌陷区损毁土地情况进行人机交互解译。按照

矿产资源开发环境遥感监测技术规范^[17-18], 叠加采矿权、含煤地层等背景资料, 主要对地裂缝、塌陷坑及诱发的侵蚀沟谷 (黄土地貌区较普遍) 等损毁土地图斑进行识别, 总结采空塌陷区典型标志物的遥感识别标准如图 3 所示。

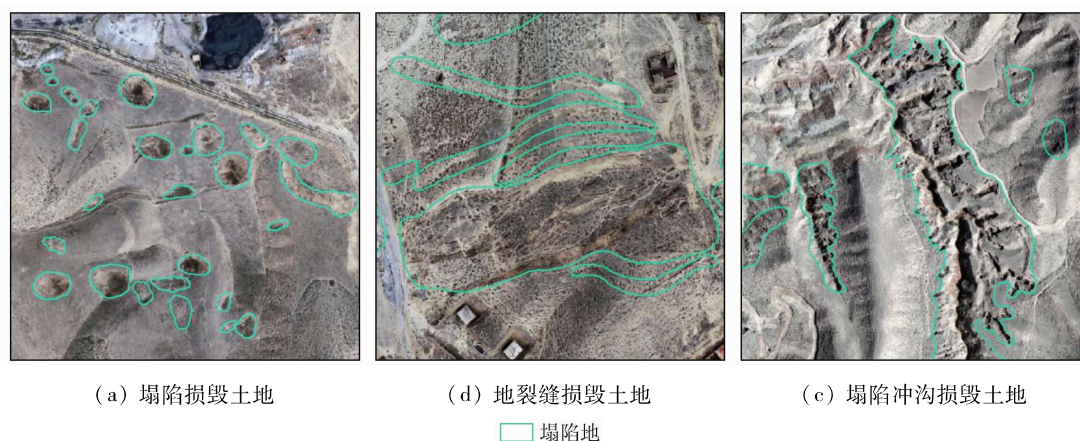


图 3 高分辨率遥感影像塌陷地识别标志

Fig. 3 Recognition marks for collapsed area in high-resolution remote sensing image

如图 4 所示, 研究区内共解译采空塌陷损毁土地图斑 3 000 余个, 损毁土地面积 2 314.94 hm², 塌

陷集中区面积 10 556.02 hm²。采空塌陷损毁土地图斑主要分布于侏罗纪地层及其周边, 大致沿地层、构造方向展布。

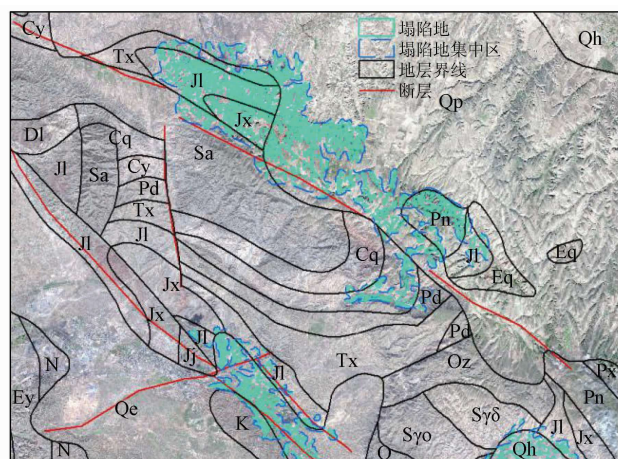


图 4 塌陷地识别结果

Fig. 4 Recognition result of collapsed ground

4 采空塌陷识别结果核查与分析

4.1 实地核查

基于研究区 Sentinel-1A 雷达影像形变区监测结果和高分辨率影像塌陷地集中区解译情况, 选择王家山煤矿等形变图斑和塌陷损毁土地图斑进行了野外核查, 形变区及塌陷损毁土地图斑遥感识别结果与野外实际情况基本一致 (图 5), 主要地表形态表现为地裂缝、塌陷坑及诱发的沿含煤地层展布的侵蚀沟谷。

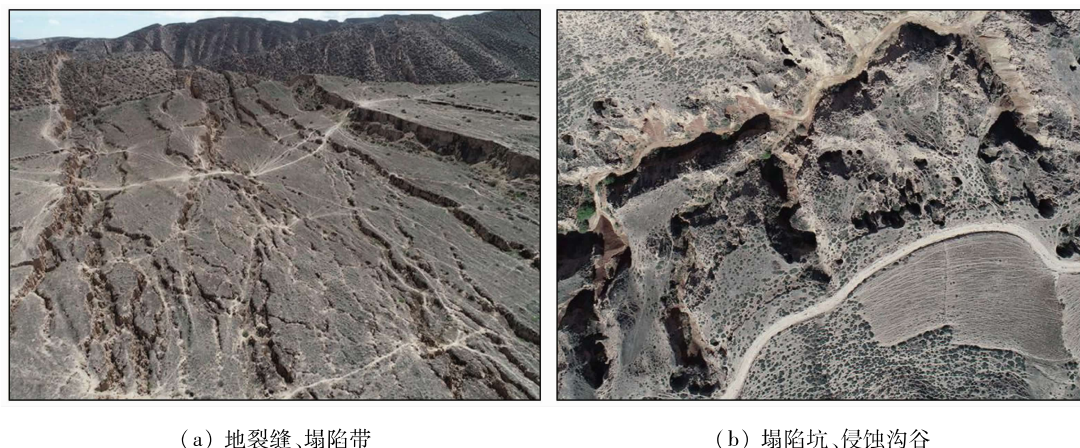


图5 实地核查照片

Fig.5 Field verification photos

4.2 采空塌陷识别结果分析

将 Stacking InSAR 地表形变监测结果与基于高分辨率光学影像的采空塌陷损毁土地解译成果进行对比分析(图6),取得了以下认识:

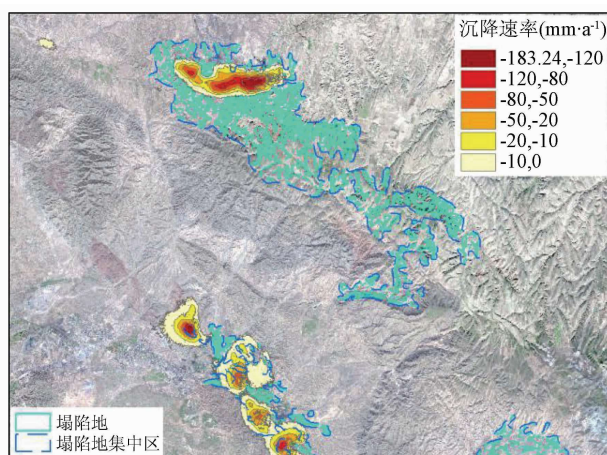


图6 采空塌陷识别结果

Fig.6 Recognition result of goaf collapse

地表形变区与采空塌陷损毁集中区重叠度高达 65.85%,其中,Stacking InSAR 所监测地表年均形变速率较大区域,基本能在高分辨率遥感影像中有损毁土地的信息反映;在年均形变速率相对较小区域,则能部分反映。据数据综合分析,年均沉降速率在 $[-183.24, -120)$ mm 和 $[-120, -80)$ mm 的形变监测区域与解译的采空塌陷集中区重叠度分别高达 94.26% 和 93.50%;年均沉降速率在 $[-80, -50)$ mm 和 $[-50, -20)$ mm 的形变监测区域与解译的采空塌陷集中区重叠度分别为 89.10% 和 76.97%;年均沉降速率在 $[-20, -10)$ mm 和 $[-10, 0]$ mm 的形变监测区域与解译的采空塌陷集中区重叠度分别为 64.88% 和 56.93%。

浅埋煤层(200 m 以内)和中埋煤层(200 ~ 500 m)采空塌陷在地表反映为强烈的地裂缝、塌陷坑等,损毁土地迹象显著,如红湾村、尖山村一带煤矿开采深

度均小于 500 m(因保密规定,未将采矿权信息在本文中展示),采用 Stacking InSAR 地表形变监测技术和基于高分辨率影像遥感识别方法均能很好地识别沉陷区域,其中基于高分辨率影像遥感识别方法能更精确地识别出塌陷损毁的土地状况。对于深埋煤层(大于 500 m)采空塌陷,因对地表破坏程度较轻,地表主要反映为微/缓形变。如平川区北侧煤矿开采深度大于 500 m,地下采煤未对地表附属物造成明显的变化、损毁迹象,高分辨率遥感影像对其识别能力相对较弱,而 Stacking InSAR 地表形变监测技术则能较好地识别矿区及周边地块内所发生微/缓形变信息,从而辅助采空塌陷区的判识。

Stacking InSAR 地表形变监测结果主要反映在采煤矿或近期开采煤矿引发的采空塌陷,反映监测期内发生的形变。基于高分辨率影像遥感识别方法则不仅能识别出现有、近期形变损毁土地图斑,还能很好地反映历史上煤矿采空塌陷损毁土地情况,如研究区内上塄村、尚书塄村南侧一带,均属于历史上煤矿采空区,采煤引发的地裂缝、塌陷及演化后的侵蚀冲沟损毁土地情况都能清晰反映。

5 结论

本研究分别利用 Stacking InSAR 雷达影像和高分辨率光学影像开展了甘肃白银某煤矿区采空塌陷遥感识别,分别获取了采空形变区和损毁土地集中区信息,经综合分析研究认为:

1) Stacking InSAR 技术能准确识别区域地表沉降/形变迹象,其形变/沉降中心或小范围陡崖式形变/沉降区块多预示采空塌陷的存在,结合矿产资源开发利用相关数据,能准确识别采空塌陷区信息。Stacking InSAR 技术对于浅部、中部、深部采煤引发的采空塌陷均能有效识别,特别适用于深部煤层开

采引发的地表微变化形变信息识别和采空塌陷区形变趋势监测分析研究。

2) 基于高分辨率光学影像遥感人机交互解译识别方法, 对于浅部、中部煤层的采空塌陷区能较好识别, 能更为精准识别出塌陷损毁土地情况, 对于目前采空塌陷形变已停止或历史上形成的采空塌陷区及损毁土地情况有很好的识别能力。

3) 目前利用多源遥感技术开展采空塌陷区的研究和应用工作尚较少, 利用 Stacking InSAR 等雷达技术对采空塌陷研究程度较低, 建议进一步加强雷达等多源遥感在采空塌陷识别的机理研究, 以更好服务于采空塌陷灾害识别、预警、防治等应用管理。

4) 近年来, 国家实施了黄河流域、长江经济带等重大生态修复保护战略部署, 综合 InSAR 雷达监测技术和高分辨率光学影像遥感识别方法的特点和优势, 有助于全面获取采矿活动引发的地表塌陷损毁土地、区域沉降/形变等信息, 可为国家实施采空塌陷区生态修复工程的规划、部署、监管提供更为详实可靠的技术支撑。

致谢: 感谢中国自然资源航空物探遥感中心杨金中博士、姚维岭高级工程师对本文的指导和帮助。

参考文献 (References):

- [1] 杨金中, 王晓红, 王海庆, 等. 中国矿山地质环境遥感监测 [M]. 北京: 地质出版社, 2019.
Yang J Z, Wang X H, Wang H Q, et al. Remote sensing monitoring of mine geological environment in China [M]. Beijing: Geology Press, 2019.
- [2] 葛维琦. 我国采空塌陷区资源城市经济转型对策 [J]. 专题探讨, 2004 (8): 7 - 9.
Ge W Q. Countermeasures for economic transformation of resource cities in goaf subsidence areas in China [J]. Special Discussion, 2004 (8): 7 - 9.
- [3] 殷亚秋, 杨金中, 汪洁, 等. 长江经济带废弃矿山占损土地遥感调查与生态修复对策 [J]. 国土资源遥感, 2020, 32 (2): 170 - 176. doi:10.6046/gtzyyg. 2020. 02. 22.
Yin Y Q, Yang T Z, Wang J, et al. Remote sensing survey of land occupied and damaged by abandoned mines along the Yangtze River Economic Belt and research on ecological remediation countermeasures [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32 (2): 170 - 176. doi:10.6046/gtzyyg. 2020. 02. 22.
- [4] 李建勤. 推进矿业城市绿色发展转型发展 [J]. 学习与研究, 2018 (3): 3.
Li J Q. Promoting the transformation and development of green development of mining cities [J]. Learning and Research, 2018 (3): 3.
- [5] 王晓红, 荆青青, 周英杰, 等. 山东省采煤沉陷遥感动态监测 [J]. 国土资源遥感, 2017, 29 (3): 203 - 210. doi:10.6046/gtzyyg. 2017. 03. 30.
Wang X H, Jing Q Q, Zhou Y J, et al. Remote sensing dynamic monitoring of coal mine subsidence disaster in Shandong Province [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29 (3): 203 - 210. doi:10.6046/gtzyyg. 2017. 03. 30.
- [6] 王海庆, 杨金中, 陈玲, 等. 采煤沉陷区恢复治理状况遥感调查 [J]. 国土资源遥感, 2017, 29 (3): 156 - 162. doi:10.6046/gtzyyg. 2017. 03. 23.
Wang H Q, Yang J Z, Chen L, et al. Remote sensing investigation of restoration and management situation in coal mine subsidence areas [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29 (3): 156 - 162. doi:10.6046/gtzyyg. 2017. 03. 23.
- [7] 汪洁, 刘小杨, 杨金中, 等. 基于国产高分辨率卫星数据的浙江省矿山环境恢复治理典型模式分析 [J]. 国土资源遥感, 2020, 32 (3): 216 - 221. doi:10.6046/gtzyyg. 2020. 03. 28.
Wang J, Liu X Y, Yang J Z, et al. Typical model analysis of mine geological environment restoration and management in Zhejiang Province based on domestic high-resolution satellite data [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32 (3): 216 - 221. doi:10.6046/gtzyyg. 2020. 03. 28.
- [8] 杨显华, 黄洁, 田立, 等. 矿山遥感监测在采空区稳定性分析中的应用 [J]. 国土资源遥感, 2018, 20 (3): 143 - 150. doi:10.6046/gtzyyg. 2018. 03. 20.
Yang X H, Huang J, Tian L, et al. Application of mine remote sensing monitoring to analysis of mine goaf stability [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 20 (3): 143 - 150. doi:10.6046/gtzyyg. 2018. 03. 20.
- [9] 杨显华, 徐肖, 肖礼晓, 等. 察尔汗盐湖演变趋势及驱动力分析 [J]. 国土资源遥感, 2020, 32 (1): 130 - 137. doi:10.6046/gtzyyg. 2020. 01. 18.
Yang X H, Xu X, Xiao L X, et al. Evolution trend and driving force analysis of the Chaerhan Salt Lake [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32 (1): 130 - 137. doi:10.6046/gtzyyg. 2020. 01. 18.
- [10] 吴立新, 高均海, 葛大庆, 等. 工矿区地表沉陷 D-InSAR 监测实验研究 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2005, 26 (8): 778 - 782.
Wu L X, Gao J H, Ge D Q, et al. Experimental study on D-InSAR monitoring of surface subsidence in industrial and mining areas [J]. Journal of Northeast University: Natural Science Edition, 2005, 26 (8): 778 - 782.
- [11] 张晓博, 赵学胜, 葛大庆, 等. 基于 Sentinel TOPS 模式 Stacking 技术监测淮南矿区沉降 [J]. 国土资源遥感, 2018, 30 (4): 200 - 205. doi:10.6046/gtzyyg. 2018. 04. 30.
Zhang X B, Zhao X S, Ge D Q, et al. Subsidence monitoring of Huainan coal mine from Sentinel TOPS images based on Stacking technique [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30 (4): 200 - 205. doi:10.6046/gtzyyg. 2018. 04. 30.
- [12] 刘一霖, 张勤, 黄海军, 等. 矿区地表大量级沉陷形变短基线集 InSAR 监测分析 [J]. 国土资源遥感, 2017, 29 (2): 144 - 151. doi:10.6046/gtzyyg. 2017. 02. 21.
Liu Y L, Zhang Q, Huang H J, et al. Monitoring and analyzing large scale land subsidence over the mining area using small baseline subset InSAR [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29 (2): 144 - 151. doi:10.6046/gtzyyg. 2017. 02. 21.

- [13] 谭庆. 基于 Sentinel-1A 数据的矿区地面沉降监测应用研究[J]. 地矿测绘, 2019, 35(1): 35-38.
Tan Q. Application Research of land subsidence monitoring in mining area based on Sentinel-1A data[J]. Geological and Mineral Mapping, 2019, 35(1): 35-38.
- [14] 陈亮, 姚顽强, 马润霞, 等. 应用 Sentinel-1A 卫星数据对宁东煤炭基地进行沉陷监测试验研究[J]. 矿山测量, 2017, 45(3): 45-48.
Chen L, Yao Z Q, Ma R X, et al. Experimental study on subsidence monitoring of Ningdong coal base using Sentinel-1A satellite data[J]. Mine Survey, 2017, 45(3): 45-48.
- [15] 罗福乾, 杨建成. 王家山煤矿的灾害链及防治措施[J]. 煤, 2005, 14(5): 43-45.
Luo F Q, Yang J C. Disaster chain and prevention measures of Wangjiashan coal mine[J]. Coal, 2005, 14(5): 43-45.
- [16] 李新, 陶秋香, 宋杨, 等. Sentinel-1A SAR 影像及其在矿区地面沉降监测中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(3): 31-34, 38.
Li X, Tao Q X, Song Y, et al. Sentinel-1A SAR image and its application in land subsidence monitoring in mining area[J]. Surveying and Spatial Geographic Information, 2019, 42(3): 31-34, 38.
- [17] 杨金中, 秦绪文, 聂洪峰, 等. 矿山遥感监测工作指南[M]. 北京: 中国大地出版社, 2011.
Yang J Z, Qin X W, Nie H F, et al. Mine Remote Sensing Monitoring Work Guide [M]. Beijing: China Land Press, 2011.
- [18] 中国地质调查局. DD2011—06 矿产资源开发遥感监测技术要求[S]. 北京: 中国地质调查局, 2011.
China Geological Survey. DD2011—06 Technical requirements for remote sensing monitoring of mineral resources development [S]. Beijing: China Geological Survey, 2011.

Application of mining collapse recognition technology based on multi-source remote sensing

YANG Xianhua¹, WEI Peng², LYU Jun³, HAN Lei¹, SHI Haolin¹, LIU Zhi¹

(1. *Sichuan Key Laboratory of Rare Earth Strategic Resources Evaluation and Utilization, Sichuan Geological Survey Institute, Chengdu 610081, China*; 2. *Sichuan Academy of Land and Space Ecological Restoration and Geological Disaster Prevention and Control, Chengdu 610081, China*; 3. *People's Government of Baodun Town, Chengdu 611438, China*)

Abstract: Mining collapse has caused damage to soil, vegetation, and water resources. With the implementation of the national ecological restoration strategy, it is significant to effectively identify and monitor collapse areas. For this purpose, based on multi-source high-resolution remote sensing images and Sentinel-1 SAR radar images, this study identified and monitored the mining collapses of a coal mine in Baiyin City, Gansu Province using the two technologies, namely the Stacking-InSAR method for extracting ground subsidence data and the human-computer interactive interpretation of optical images of mining collapse. Moreover, this study comprehensively compared the characteristics of both techniques and explored the application prospects of both techniques in the deployment of ecological restoration engineering. The results are as follows: ① The Stacking-InSAR radar monitoring technology can better reflect the deformation during the monitoring period and can effectively identify the mining collapse areas in shallow, middle, and deep coal seams. ② The high-resolution optical image technology can better identify the mining collapse areas in shallow and middle coal seams, more accurately identify the damaged land, and can well identify the historically formed mining collapse areas and damaged land whose collapse deformation has stopped. ③ The collapse deformation and land damage of various stages can be obtained by combining the InSAR monitoring technology and the recognition method base on high-resolution remote sensing images, thus providing detailed and reliable basic data for ecological restoration engineering.

Keywords: mining collapse; high-resolution optical image; Stacking-InSAR; Sentinel-1; ecological restoration

(责任编辑: 李瑜)