

基于 D-InSAR 技术的采煤沉陷区地面形变隐患识别与影响分析

安 全,李思发,黄广才,韦 瑾,李 亮,况 忠,卢定彪

(1. 贵州省地质调查院,贵州 贵阳 550081;2. 自然资源部基岩区矿产资源勘察技术创新中心,贵州 贵阳 550081)

[摘 要]本文基于 D-InSAR 技术,通过 SARscape 5.2.1 雷达影像处理平台获取了 2021 年 6 月至 2021 年 9 月鬃岭-勺窝集中采煤区的地表形变信息,同时采用典型形变处最新采空区、采煤巷道数据和野外调查核实方式验证了监测结果的准确性和可靠性。结果表明:(1)本文采用 D-InSAR 技术成功识别了纳雍县鬃岭-勺窝采煤沉陷区 3 处地面沉降变形隐患,其影响面积分别为 P1 处约为 0.06 km^2 ,P2 处约为 0.14 km^2 ,P3 处约为 0.07 km^2 ;(2)典型沉降区土地利用现状分析表明沉降中心人类活动的强度在缓慢增加,其表现在 2017—2021 年期间耕地、林地、水体面积减少,居民区、工矿用地、灌木林地以及设施农用地面积增加;重要地类现状实地调查结果表明,典型地面沉降已对居民区房屋道路造成了损坏,对沉陷区生活的人民生命和财产安全造成一定程度的安全隐患。基于此,本文研究 D-InSAR 技术在岩溶山区集中采煤区地面沉降隐患识别与采矿活动对人类活动的影响为保障矿区人民的生命和财产安全提供了有力的技术支撑,在开采矿区地表环境的整治及人与自然协调发展方面具有一定的现实意义。

[关键词]D-InSAR;L 波段雷达;变形监测;采矿沉陷;岩溶地区

[中图分类号]P694;P618.2;TD1 [文献标识码]A [文章编号]1000-5943(2023)01-26-10

岩溶地区独特的地质环境导致该地区生态环境较非岩溶地区脆弱,加之不合理的人类活动影响加剧了该地区生态环境问题突出。煤矿开采作为人类社会生活、生产以及经济发展的重要能源获取渠道之一,其对岩溶环境的影响不可小觑。现如今,尽管煤矿开采在技术、装备、理论以及综合机械化采煤、资源域环境协调开采方面都取得了长足的进步,但是地下煤炭资源的开挖会引起煤层上覆岩层的应力重新分布,造成岩层移动和破坏,当岩层移动发展到地表会引发地表沉陷、浅表水系破坏、土壤污染等环境问题。针对岩溶地区煤矿在开采后引起的环境问题,相关的研究工作尚存在不完善。因此,开展岩溶地区煤矿开采沉降监测及其影响分析,对于保障煤矿安全生产,实现岩溶地区煤矿资源开采与环境协调发展具有

重要的科学意义(何国清等,1991;陈萍,2015;周泽,2017;汤伏全等,2019)。

地面沉降是一种缓变形地质灾害,传统的地面沉降监测技术如水准测量、GPS 测量和伸缩计等虽然监测精度高,但是测量方式为点对点,站点布设稀少且耗时费力,测量结果难以反应大区域连续面上的地表变形状况(吴立新等,2004;何庆成等,2006;王行凤等,2007);随着地质灾害领域探测技术的发展,合成孔径雷达干涉测量(synthetic aperture radar interferometry, InSAR)技术因其成本低、全天时、全天候、大区域尺度获取地表连续面上微小形变信息的优势引起了地质灾害从业者的重视,合成孔径雷达差分干涉测量(differential InSAR, DInSAR)技术是在 InSAR 的基础上通过相位差来获取地表形变的技术,1989 年,Grabriel 等首次

[收稿日期]2022-12-15 [修回日期]2023-01-18

[基金项目]贵州省地质矿产勘查开发局地质科研项目(合同编号:黔地矿科合[2021]23 号)资助。

[作者简介]安全(1991—),男,硕士,工程师,主要从事 GIS 与雷达遥感地质灾害监测及应用研究。Email:932599540@qq.com。

论证了 DInSAR 技术可用于探测厘米级的地表变形 (Gabriel et al,1989)。我国近些年来利用 DInSAR 技术监测老采空区残余变形、矿区地面沉降研究方面取得了不少成果(高腾飞等,2016)。相关学者也采用该技术对火山、地震、滑坡、微地形变化、城市地面沉降等领域开展了研究,其分析结果具有一定的可靠性,可以用于探查矿山开采引起的沉降隐患(姚鑫等,2017;汪东等,2019;齐麟等,2020)。目前,D-InSAR 技术在地质灾害领域的监测应用越来越广泛,但基于 D-InSAR 技术的岩溶山区相位梯度变化比较大的集中采煤区大区域地面沉降监测及其影响方面的研究还比较少(郭强,1989;吴采艳等,2006;龚兴祥等,2009;刘晓菲等,2014;朱怡飞等,2022;况忠等,2022;李思发等,2022)。

基于此,本文采用 D-InSAR 技术,选用 2021 年 6 月至 2021 年 9 月同一轨道共 2 景覆盖鬃岭-勺窝采煤沉陷区的 ALOS-2 L 波段雷达卫星 SLC 级数据对贵州西部典型采煤沉陷型区域纳雍县鬃岭-勺窝采煤沉陷区地表开展了雷达干涉形变隐患监测识别及矿区形变对人类活动的影响研究,

以期为保障采矿沉陷地区人民的生命和财产安全提供有力的技术支撑。

1 研究背景

实验区位于 $105^{\circ}19'22.08''\sim 105^{\circ}11'31.02''$ E, $26^{\circ}39'25.02''\sim 26^{\circ}45'25.02''$ N 之间(如图 1 所示),面积为 105.27 km^2 ,涉及乡镇总人口 7.3 万人,平均人口密度为每平方千米 468 人。区内整体为脊状山、中山地貌,地势东高西低,最高海拔 $2\,331.5\text{ m}$,最低海拔 $1\,551.60\text{ m}$,相对高差 779.70 m ;区内出露地层主要为二叠龙潭组(P_3l)、三叠系飞仙关(T_1f)地层;气候为亚热带季风气候区,年平均降雨量 $1\,243.5\text{ mm}$,降雨多集中在 6—8 月份。研究区大小矿井总共 23 个,分布集中,矿井平面面积占研究区面积的 33.47% ,区内煤炭资源丰富,小煤窑开采历史悠久,特别是二十世纪八十年代到九十年代,小煤矿乱采乱挖现象较普遍,且大多数小矿井缺乏相应加固工程措施,形成了多处地质灾害隐患。

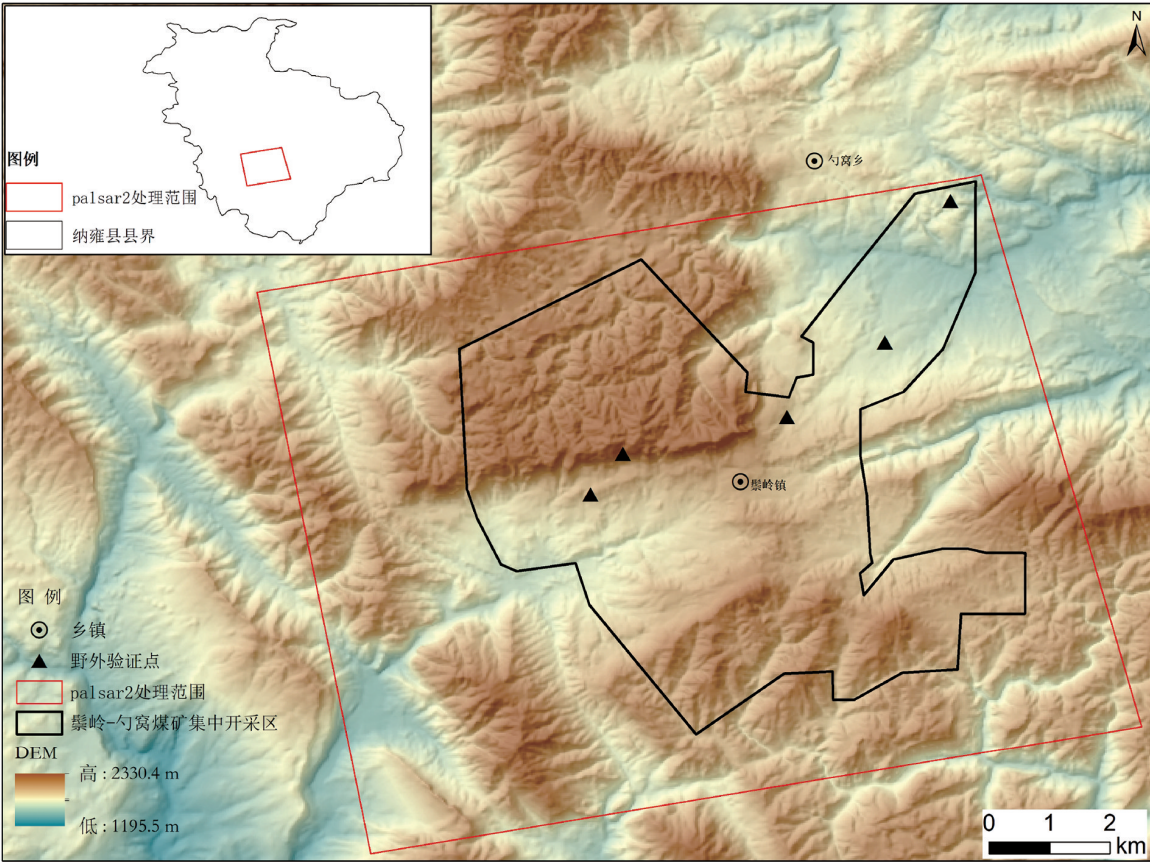


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Overview map of the study area

2 研究方法 with 数据

2.1 D-InSAR 技术识别地表变形原理

合成孔径雷达干涉测量技术 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 是干涉测量技术与合成孔径雷达技术的结合, 是通过传感器主动发射电磁波来识别地物目标的相位信息和散射强度信息的微波遥感技术, 其获取地面微小形变的原理是通过差分技术消除观测相位中的地形误差、平地相位误差、大气相位以及噪声相位误差, 进而根据 (1) 式解算出形变量:

$$\Delta r = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi_{def} \quad (1)$$

式中: Δr 为地面目标点在雷达视线向 (LOS) 上的形变量; λ 表示雷达传感器工作波长 (ALOS PALSAR-2 的波长为 23.6 cm); φ_{def} 表示由两次观测期间沿着雷达 LOS 地表形变引起的形变位移^[1], D-InSAR 获得干涉的相位为

$$\varphi_{int} = \varphi_{def} + \varphi_{flat} + \varphi_{tope} + \varphi_{atmo} + \varphi_{noise} \quad (2)$$

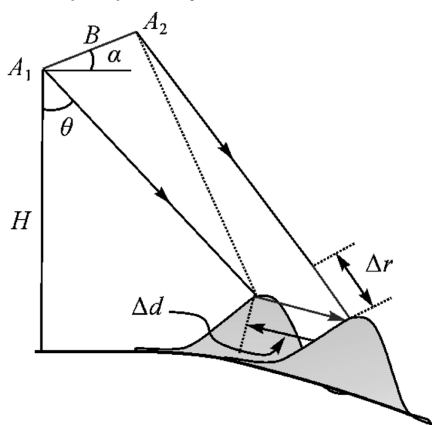


图 2 差分干涉测量几何关系

Fig. 2 Differential interferometry geometry

式中: φ_{def} 为形变相位, 是由两次观测期间沿

着雷达 LOS 地表形变引起的干涉相位; φ_{flat} 为平地相位, 是由参考椭球面引起的干涉相位; 平地效应使得干涉条纹比较密集, 导致相位解缠很难进行, 可通过多项式消除; φ_{tope} 为地形相位, 是由地形起伏所引起的干涉相位, 通常由外部获取的 DEM 模拟地形相位, 并进行差分处理, 消除地形相位; φ_{atmo} 为大气相位, 是由两次观测期间大气条件不同引起, φ_{atmo} 的去除方式目前还没有好的方法, 降低大气误差的途径是尽量选择时间周期合适的影像, φ_{noise} 表示噪声相位, 是由传播过程中各种噪声所引起的, 可以通过滤波的方式减弱。其中差分干涉测量的几何关系如图 2 所示 (朱建军等, 2017)。

2.2 数据处理

研究选用 2021 年 6 月 6 日与 2021 年 9 月 26 日 2 期覆盖研究区的 HH 极化升轨 ALOS-2 雷达数据, 影像分辨率为 3 m。文中采用 SARscape 5.2.1 雷达影像处理平台基于 D-InSAR 技术进行数据处理的步骤主要包括原始数据格式转换、干涉图生成、滤波和相干系数的计算、相位解缠、控制点选取、轨道精炼与重去平和地理编码等, 其中 ALOS-2 数据基本参数如表 1 所示。

数据处理过程中为了获得更好的结果, 干涉图生成步骤的距离向和方位向视数设置为 1:1, 滤波方法选择 goldstein, 相位解缠方法选择最小费用流 (Mnimow Cost Flow), 解缠相关系数阈值设置大于 0.2 的保留, 轨道精炼方法选择多项式轨道精炼 (Polynomial Refinement)。本次数据处理主影像为 2021 年 6 月 6 日存档影像、辅影像为 2021 年 9 月 26 日存档影像, 通过主辅影像基线估计获得时间基线为 112 天, 空间基线为 206.86 m, 空间基线远远小于 35 527.587 m, 其中基线估算的高程精度和形变精度随着相关系数的变化关系如图 3 所示。

表 1 ALOS-2 数据基本参数

Table 1 ALOS-2 Data Basic Parameters

编号	主影像	从影像	时间基线/d	垂直基线/m	临界基线/m
3	palsar2_20210606	palsar2_20210926	112	206.863	35 537.687

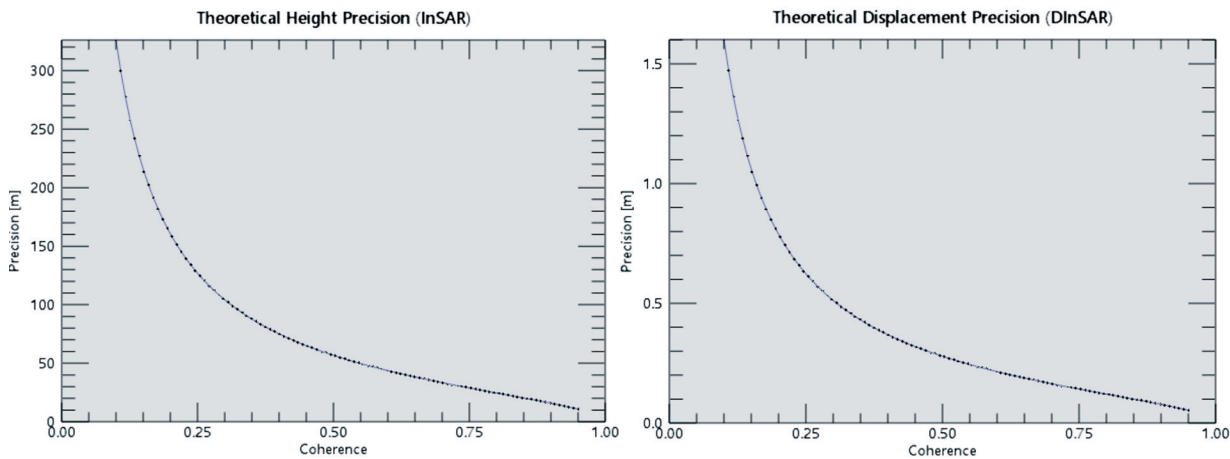


图 3 高程精度和形变精度随着相关系数的变化

Fig. 3 The accuracy of elevation and deformation changes with the correlation coefficient

3 结果与分析

3.1 鬃岭-勺窝集中采煤区 D-InSAR 技术形变识别结果分析

文中基于 D-InSAR 技术获取的鬃岭-勺窝集中采煤区视线方向 (Line of sight, LOS) 地表形变识别结果如图 4 所示,红色负值表示地物目标位移远离卫星传感器的方向,即目标地物发生了沉降变形;绿色正值表示地物目标位移朝着卫星传感器的方向,即目标地物相对于卫星传感器的方向发生了抬升变形。从图 4 中的形变像素值

空间分布特征来看,本次观测时段内共识别出了 3 处典型沉降变形区,分别为 P1、P2、P3 红色椭圆圈标示处,其中 P1 处典型沉降中心位于中岭井田开采工作面内,P2 处典型沉降中心位于小树林-小龙井矿井开采工作面内,P3 处典型沉降中心位于沙田矿井开采工作面内,3 处典型沉降变形中心影响范围 P1 处约为 0.06 km²,P2 处约为 0.14 km²,P3 处约为 0.07 km²。D-InSAR 结果分析表明,利用 D-InSAR 技术提取 L 波段 pal-sar2 探测形变主要为沉降变形,实地调查结果表明其发生变形处与矿井工作面具有较好的一致性,除了典型沉降隐患区外大部分区域地表较为稳定。

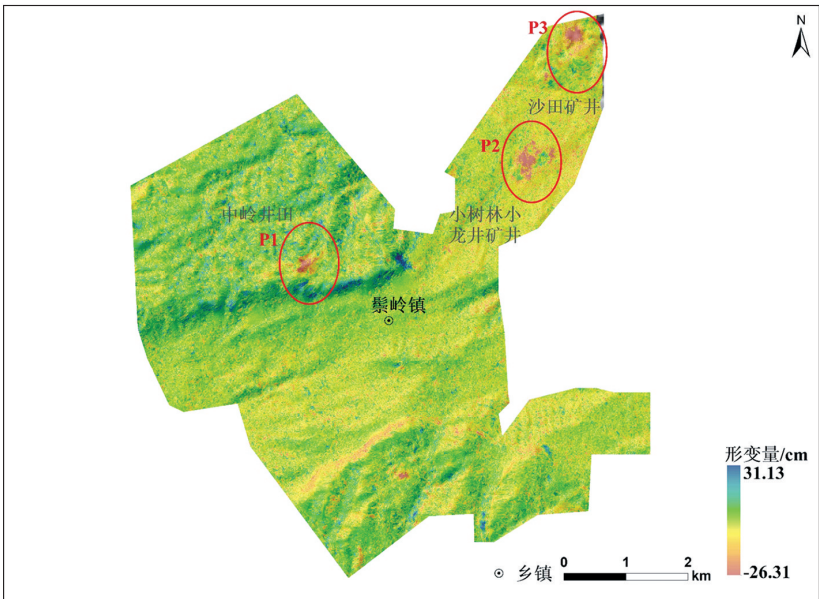


图 4 鬃岭-勺窝集中采煤区 D-InSAR 技术形变识别结果

Fig. 4 Deformation identification results of D-InSAR technology in Zongling-Shaowo centralized coal mining area
P1—典型形变区;P2—典型形变区;P3—典型形变区

3.2 形变结果的准确性与可靠性分析

形变区准确性和可靠性的分析是检验 D-InSAR 技术监测结果是否准确可靠的有力佐证。文中依据 2020 年贵州省矿产资源国情调查数据库最新典型沉降变形处矿井采空区、采煤巷道数据和实地调查核实方式验证监测结果的准确性可靠性,验证结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,中岭井田、沙田矿井沉降变形处与采空区、采煤巷道在地表的投影面一致,小树林-小龙井矿井沉降

变形处位于老采空区边缘,但从采煤巷道叠加图来看,新的采煤巷道与沉降变形区吻合度较好,通过分析相关资料可知,小树林-小龙井矿井目前仍然未生产矿井,本次监测的沉降变形区位于新的开采工作面上,故而与老采空区吻合度不高。但总体来看沉降变形中心与矿井采空区,采煤巷道基本一致。另外,对典型沉降中心进行了现场调查核实,核实结果与监测结果一致,沉降变形严重处可以明显看见房屋地基沉陷、墙体开裂以及路面拉张裂隙发育。验证结果表明,监测结果准确可靠。

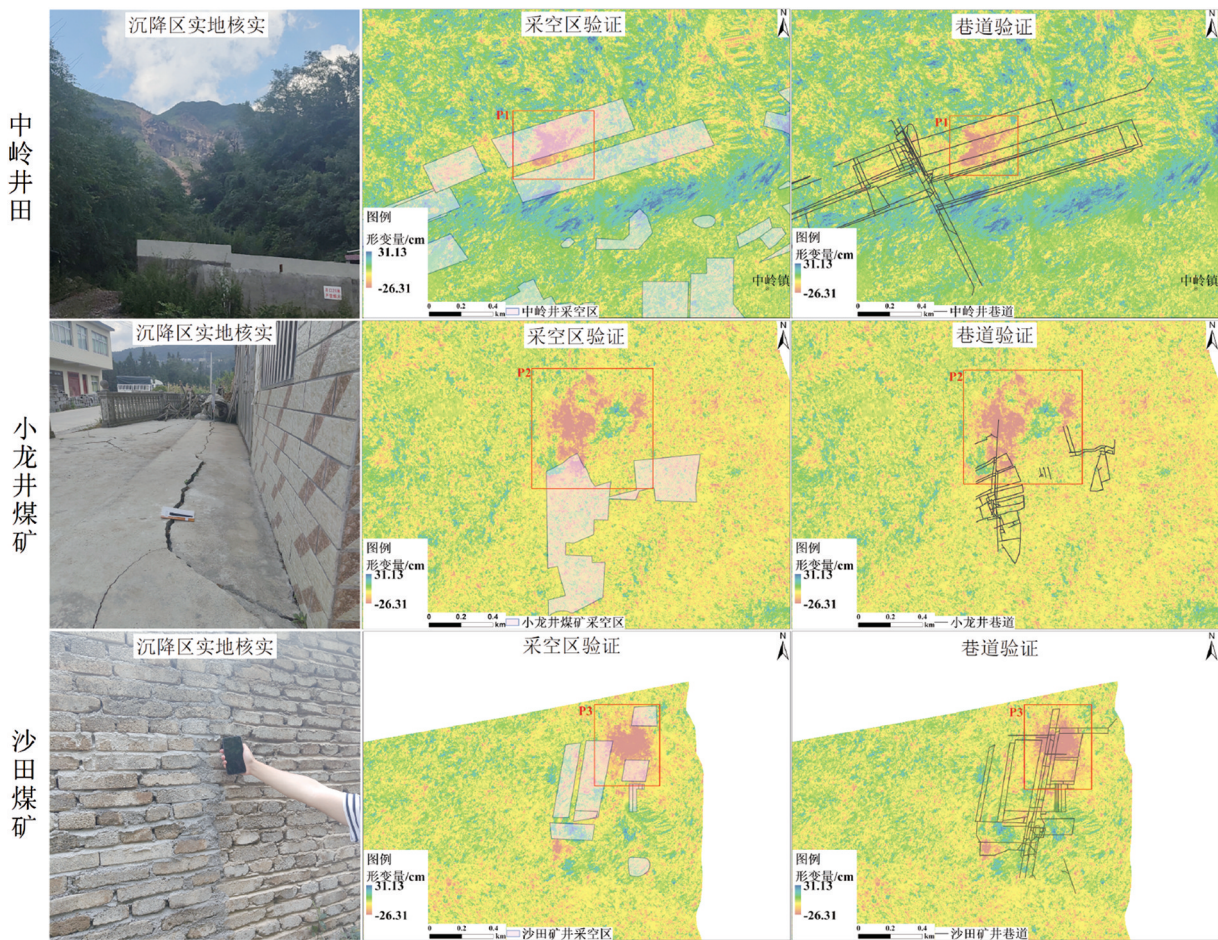


图 5 典型沉降变形中心可靠性分析

Fig. 5 Reliability analysis of typical settlement deformation center

P1—典型形变区;P2—典型形变区;P3—典型形变区

为进一步分析典型沉降变形区的地层岩性特征,文中根据贵州 1:5 万以角、纳雍、滥坝、白兴、马场 5 幅岩溶石山区域地质调查图提取典型沉降变形中心地层,再将提取地层资料与典型沉降变形中心进行叠加显示与分析,叠加结果如图 6 所示。分析典型沉降变形区地质岩性特征可知,形变处上覆地层为三叠系下统飞仙关组一段(T_1^f)、三

叠系下统飞仙关组三段(T_1^f),下覆地层为二叠系乐平统龙潭组地层(P_3l)。从岩性组合特征看,二叠系乐平统龙潭组上段为区内主要含煤地层,由泥质粉砂岩、泥灰岩及煤层组成,三叠系下统飞仙关组一段(T_1^f)、三叠系下统飞仙关组三段(T_1^f)岩性以泥质粉砂岩夹薄层泥灰岩为主,工程力学性质较好;整体上看,形变隐患区地层岩性

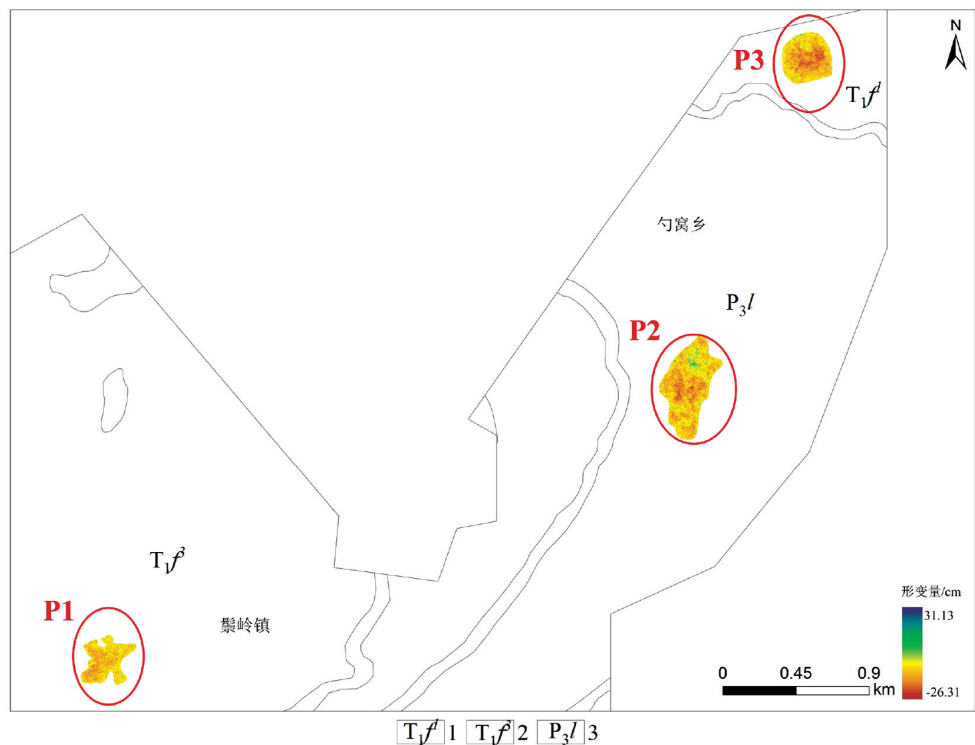


图 6 典型沉降中心地质岩性特征

Fig. 6 Geological and lithological characteristics of typical subsidence center

1—三叠系下统飞仙关组一段;2—三叠系下统飞仙关组三段;3—二叠系乐平统龙潭组;P1—典型形变区;P2—典型形变区;P3—典型形变区

组合结构表现为上硬下软的特征。地下煤层的不断开采与特殊地层岩性组合结构促使该地区开挖煤层上覆岩层的应力重新分布,造成岩层移动和破坏地速度加快是该地区地表沉降变形较为严重的主要成因之一。

3.3 鬃岭-勺窝集中采煤区地表形变对人类活动的影响分析

矿井开采沉陷会对地面环境与居民区建构筑物等造成破坏,造成严重的安全问题。文中通过覆盖矿区 2017 年第三次全国土地调查影像与 2021 年航拍影像采用目视解译出典型沉降变形中心地表土地覆被(如图 7 所示),结合典型沉降变形中心两期地表土地覆被现状,文中选择 P2、P3 处典型沉降变形中心作为分析采矿沉陷对矿区地表环境与居民区建构筑物的影响,并通过实地方式现场了解典型沉降地区地面沉降对居民区及建构筑物的影响现状,其中解译影像相关参数见表 2,土地利用解译结果数据见表 3。

文中基于 2017、2021 年影像,依据新版《土地利用现状分类》(GB/T 21010-2017)标准和沉降中心土地利用现状目视解译结果如表 3 所示,表 3

统计结果显示解译的典型沉降变形中心地类主要为耕地、林地、道路、水体、草地、居民区、工矿用地、灌木林地以及设施农用地共 9 个。从表 3 中可以看出 2017 至 2021 年期间典型沉降中心耕地、林地、水体面积减少,居民区、工矿用地、灌木林地以及设施农用地面积增加,道路和草地面积变化不大,其中耕地面积减少了 0.015 4 km²,林地面积减少 0.0073 km²,水体面积减少了 0.000 1 km²;居民区面积增加了 0.001 8 km²,工矿用地面积增加了 0.000 1 km²,灌木林地面积增加了 0.013 3 km²,设施农用地面积增加了 0.007 6 km²。典型沉降隐患区土地利用结果分析表明,典型沉降变形区人类活动的强度在增加,尤其以 P2、P3 沉降变形处最为明显。

基于 ArcGIS 10.2 软件解译的 2017、2021 年典型沉降中心土地利用现状对比图如图 7 所示,从图 7 中可以看出,2017 至 2021 年期间小树林-小龙井矿井沉降中心林地范围变小,居民区和设施农用地面积增加明显;沙田矿井沉降中心林地面积减少,灌木林地和工矿用地面积增加明显。由此可知典型沉降中心人类活动的强度在缓慢增加。

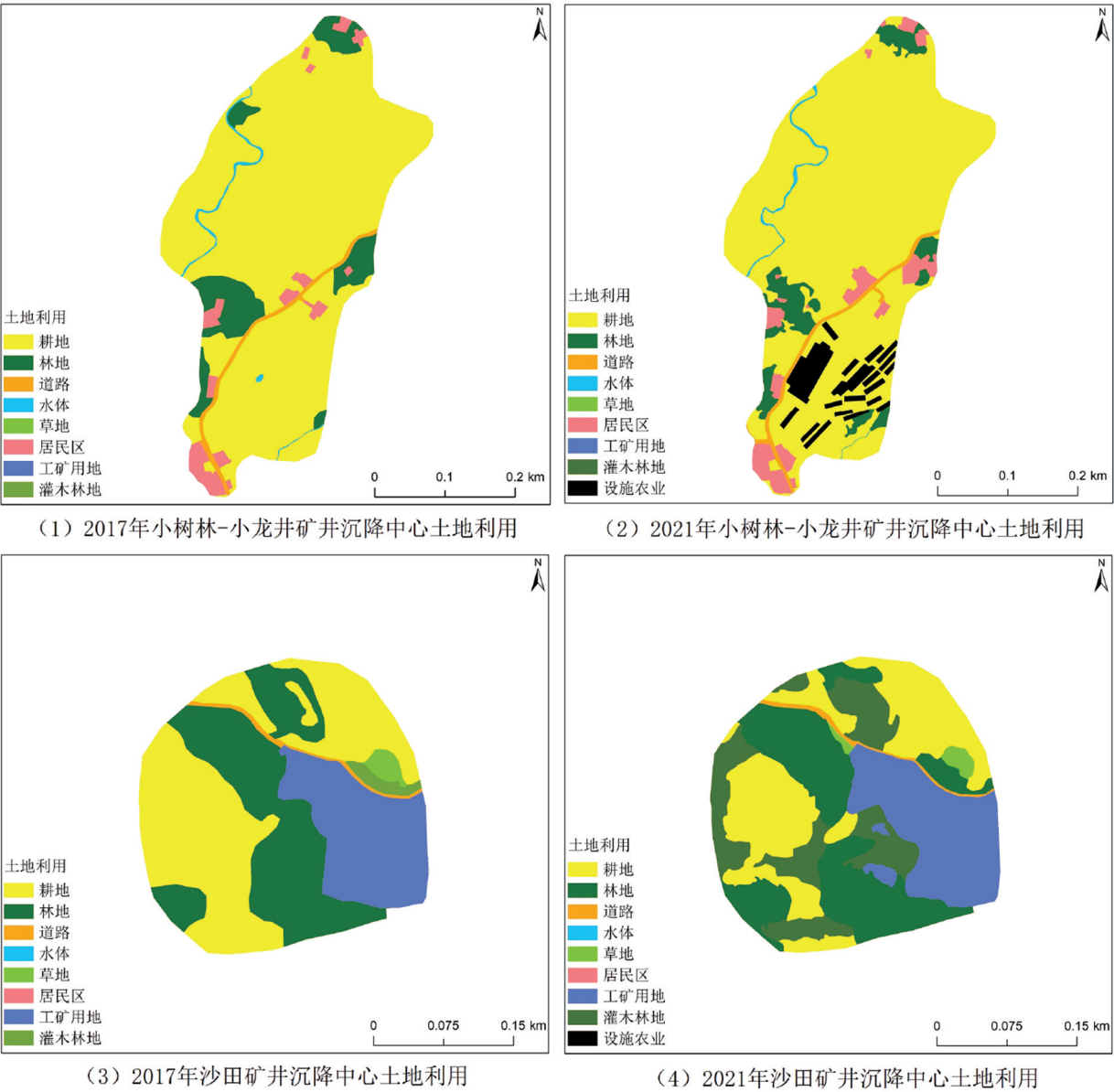


图 7 2017、2021 年典型沉降中心土地利用现状

Fig. 7 Land use status of typical settlement center in 2017 and 2021

表 2 解译影像相关参数

Table 2 Interpreting image-related parameter

年份	影像名称	分辨率/m	数据来源
2017 年	522426PL1+GJ1+WV2DOM01	0.5×0.5	全国第三次土地调查数据库
	522426PL1+GJ1+WV2DOM01		
2021 年	2021 年航飞影像	0.2×0.2	贵州省矿产资源国情数据库

表 3 2017、2021 年典型沉降变形中心土地利用解译结果

Table 3 Land use interpretation results of typical subsidence deformation centers in 2017 and 2021

年份	耕地	林地	道路	水体	草地	居民区	工矿用地	灌木林地	设施农用地
2017 年	0.153 6	0.038 8	0.003 8	0.001 3	0.001 0	0.006 0	0.016 8	0.001 1	0.000 0
2021 年	0.138 2	0.031 5	0.003 8	0.001 2	0.001 0	0.007 8	0.016 9	0.014 4	0.007 6

注：表 3 中各土地利用类型面积单位为 km²

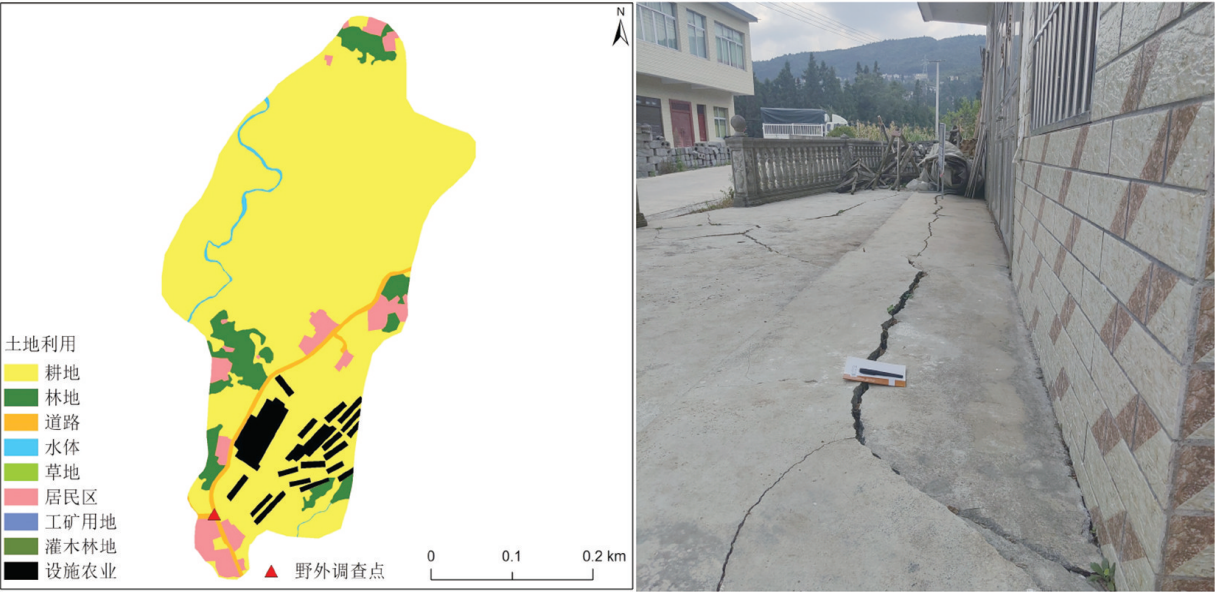


图 8 开采矿区地面沉降对地表居民区的影响

Fig. 8 Influence of land subsidence in the mining area on the surface residential area

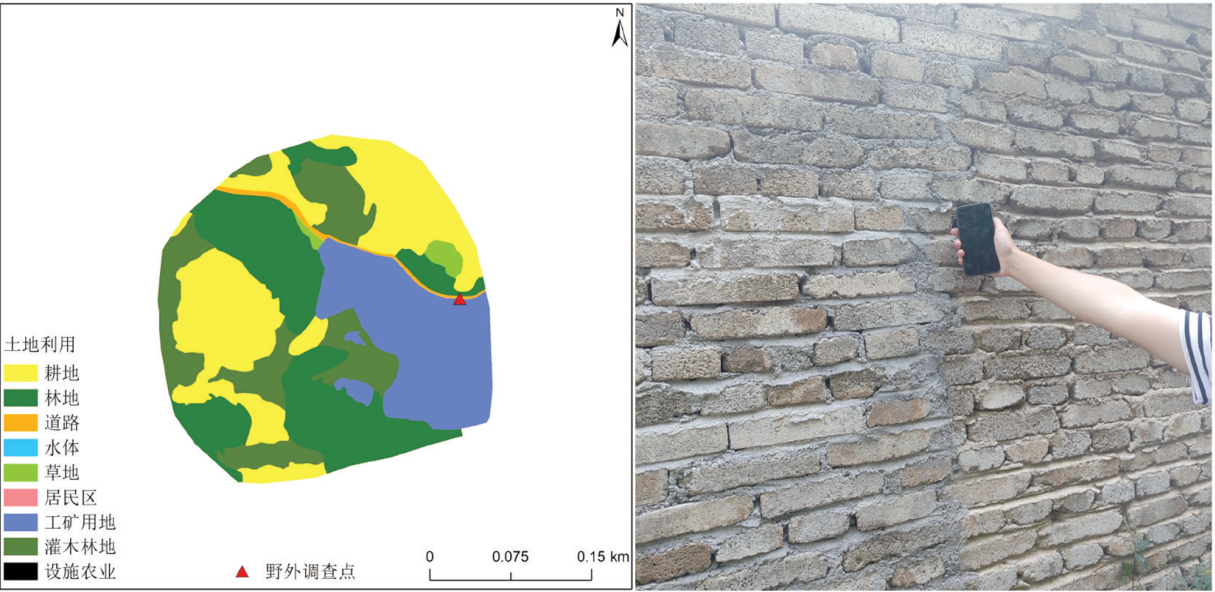


图 9 开采矿区地面沉降对地表工矿用地的影响

Fig. 9 Influence of land subsidence in mining area on surface land for industrial and mining

文中针对解译的典型沉降中心居民区及建构筑物等人类活动强度较高区域进行了现场调查,调查结果如图 8、图 9 所示,通过对典型沉降中心居民区及建构筑物等重要地类现状实地调查可知,实地调查处居民楼地基下沉、墙体开裂,路面拉张裂隙清晰可见。由此可见,该区域由于地下煤层的不断开挖,引起煤层上覆岩层的应力重新分布,造成岩层移动和破坏的强度增大,采煤活动强度高的区域上覆岩层应力重新分布叠加地表软弱层在人为因子和复杂气象因子相互耦合作用后使得地表处于活跃的不稳定性状态,当因采煤引起的地

面沉降达到一定阈值临界时,此时的地面沉降就对地表的居民楼、建构筑物设施造成损坏,从而对沉陷区生活的人民生命和财产安全造成一定程度的安全隐患。

4 讨论

本文采用 D-InSAR 技术,选用 2021 年 6 月至 2021 年 9 月同一轨道共 2 景覆盖鬃岭-勺窝采煤沉陷区的 ALOS-2 L 波段雷达卫星 SLC 数据对贵州西部典型采煤沉陷型区域纳雍县鬃岭-勺窝采煤沉

陷区地表沉陷隐患开展了雷达干涉沉降隐患识别及其影响分析,成功探查了 3 处典型沉降变形,并通过典型沉降变形中心矿井最新采空区、采煤巷道等数据和实地调查核实方式检验了监测结果的准确性与可靠性,但 D-InSAR 技术的缺点是易受天气、时空相干影响,然而贵州西部岩溶山区地形地貌复杂,海拔高差大,天气易受局地小气候影响,这种特殊的条件组合下 D-InSAR 技术很难完整的探查监测区域的地表形变信息,但尽管如此,相比于传统地面水准、GPS 点对点测量而言,D-InSAR 技术可快速、较为准确地识别出大面积地区连续面上的地表形变隐患。鉴于此,联合多轨道、多时相、多波段雷达与地面监测站结合的大区域岩溶山区地面形变监测时今后研究的方向。

5 结论

本文采用 D-InSAR 技术,选用 2021 年 6 月至 2021 年 9 月同一轨道共 2 景覆盖鬃岭-勾窝采煤沉陷区的 ALOS-2 L 波段雷达卫星 SLC 数据对贵州西部典型采煤沉陷型区域纳雍县鬃岭-勾窝采煤沉陷区地表沉陷隐患开展了雷达干涉沉降隐患识别及其影响分析。

结果表明:(1)本文采用 D-InSAR 技术成功识别了纳雍县鬃岭-勾窝采煤沉陷区 3 处因采煤活动引起成的地面沉降变形隐患,采用沉降区矿井最新采空区、采煤巷道数据和实地调查核实方式验证了监测结果的准确性和可靠性,3 处典型沉降变形隐患影响面积分别为 P1 处约为 0.06 km²,P2 处约为 0.14 km²,P3 处约为 0.07 km²;(2)典型沉降区土地利用现状分析表明 2017 至 2021 年期间耕地、林地、水体面积减少,居民区、工矿用地、灌木林地以及设施农用地面积增加,道路和草地面积变化不大,通过对典型沉降中心居民区及建构筑物等重要地类现状实地调查可知,研究区地面沉降已对居民区房屋道路造成了损坏,对沉陷区生活的人民生命和财产安全造成一定程度的安全隐患。基于此,本文研究 D-InSAR 技术在岩溶山区集中采煤区地面沉降隐患识别与采矿活动对人类活动的影响为保障矿区人民的生命和财产安全提供了有力的技术支撑,在开采矿区地表环境的整治及人与自然协调发展方面具有一定的现实意义。

[参考文献]

- 陈萍. 2015. 岩溶山区矿坑顶板冒落导水裂隙带高度估算有关问题讨论[J]. 贵州地质, 32(1): 53-58.
- 高腾飞,陶秋香,刘国林,等. 2016. L 波段 D-InSAR 在矿区地面沉降检测中的应用[J]. 中国科技论文, 11(15): 1738-1742.
- 龚兴祥,赵弦. 2009. 纳雍县地质灾害隐患的类型、成因及预防措施[J]. 贵州地质, 26(36): 234-237.
- 郭强. 1989. 遵义金塘谷地岩溶塌陷形成机理初步探讨[J]. 贵州地质, 6(2): 163-171.
- GB/T 21010-2017. 2017. 《土地利用现状分类》[S]. 北京: 中国标准出版社, 1-10.
- 何国清,杨伦,凌庚娣,等. 1994. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1-375.
- 何庆成,方志雷,李志明,等. 2006. InSAR 技术及其在沧州地面沉降监测中的应用[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京); 北京大学), 13(1): 179-184.
- 况忠. 2022. 西藏改则亭贡地区遥感地质信息提取及找矿预测[J]. 贵州地质, 39(1): 80-86.
- 李思发. 2022. 基于 GF2 卫星数据的矿山遥感监测方法及对象识别研究[J]. 贵州地质, 39(1): 87-91.
- 刘晓飞,邓喀中,范洪冬,等. 2014. 基于 D-InSAR 监测老采空区残余变形的试验[J]. 煤炭学报, 39(3): 467-472.
- 齐麟,孔祥意,袁鑫,等. 2020. 基于 D-InSAR 技术的金沙江地区滑坡形变监测与分析[J]. 测绘与空间地理信息, 43(2): 175-181.
- 汤伏全,董龙凯,王宗良,等. 2019. 基于沉陷对称特征的近水平煤层开采 InSAR 三维位移反演模型[J]. 煤炭学报, 44(1): 210-220.
- 汪东,来风兵,陈孟禹,等. 2019. 基于 InSAR 技术天山乌吐劲河谷同震形变遥感研究[J]. 国土资源遥感, 31(1): 187-194.
- 王行风,汪云甲,杜培军,等. 2007. 利用差分干涉测量技术监测煤矿区开采沉陷变形的初步研究[J]. 中国矿业, 16(7): 77-80.
- 吴采艳,乔建平,王成华,等. 2006. 贵州省纳雍县鬃岭镇“12·3”大型崩塌灾害分析[J]. 水土保持研究, 13(6): 100-102.
- 吴立新,高军海,葛大庆,等. 2004. 基于 D-InSAR 的开采沉陷遥感监测技术分析[J]. 地理与地理信息科学, 20(2): 22-25.
- 姚鑫,张永双,李凌婧,等. 2017. 青藏高原鲜水河活动断裂带蠕变斜坡地质灾害 InSAR 识别研究[J]. 地质学报, 91(8): 1693-1705.
- 周泽. 2017. 岩溶矿区采动裂隙发育及其地表塌陷规律研究[D]. 湖南: 湖南科技大学.
- 朱建军,李志伟,胡俊,等. 2017. InSAR 和变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报, 28(2): 1717-1733.
- 朱怡飞,姚鑫,姚磊,等. 2022. 基于 InSAR 和光学遥感的贵州鬃岭采煤滑坡识别与危险性评价[J]. 地质力学.
- Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. 1989. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 94 (B7): 9183-9191.

Hidden Trouble Identification and Impact Analysis of Ground Deformation in Coal Mining Subsidence Area Based on D-InSAR Technology

AN Quan, LI Si-fa, HUANG Guang-cai, WEI Jin, LI Liang, KUANG Zhong, LU Ding-biao

- (1. *Guizhou Geological Survey, Guiyang 550081, Guizhou, China;*
2. *Technical Innovation Center for Mineral Resources Exploration in Bedrock Area, Ministry of Natural Resources, Guiyang 550081, Guizhou, China*)

[**Abstract**] Based on D-InSAR technology, the surface deformation information of Zongling-Shaowo centralized coal mining area from June 2021 to September 2021 was obtained through SARscape 5.2.1 radar image processing platform. At the same time, the accuracy and reliability of the monitoring results were verified by the latest data of goaf and coal roadway at typical deformation sites and field investigation and verification methods. The results show that: (1) Three hidden dangers of land subsidence and deformation are successfully identified by D-InSAR technology in Zongling-Shaowo coal mining subsidence area of Nayong County, and the affected areas are about 0.06 km² in P1, 0.14 km² in P2 and 0.07 km² in P3, respectively; (2) The analysis of land use status in the typical subsidence area shows that the intensity of human activities in the subsidence center is slowly increasing, which is reflected in the decrease of cultivated land, woodland and water area, and the increase of residential area, industrial and mining land, shrub land and facility agricultural land from 2017 to 2021; The field survey results of important land types show that typical land subsidence has caused damage to houses and roads in residential areas, and has caused a certain degree of potential safety hazards to people's lives and property in subsidence areas. Based on this, in this paper, it studies the hidden danger identification of land subsidence and the impact of mining activities on human activities by D-InSAR technology in concentrated coal mining areas of karst mountainous areas, which provides a strong technical support for ensuring the safety of people's lives and property in mining areas, and has a certain practical significance in the regulation of the surface environment of mining areas and the coordinated development of man and nature.

[**Key Words**] D-InSAR; L-band radar; Deformation monitoring; Mining subsidence; Karst area