

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2020.04.14

引用格式: 汤志刚,景佳俊,颜士顺,等.基于InSAR监测数据的石膏矿采空塌陷特征分析——以邳州平台矿和希州矿为例[J].中国地质调查,2020,7(4):112-117.

基于 InSAR 监测数据的石膏矿采空塌陷特征分析 ——以邳州平台矿和希州矿为例

汤志刚¹, 景佳俊¹, 颜士顺¹, 潘九宝², 李梦梦²

(1. 江苏省地质矿产局第五地质大队, 徐州 221004; 2. 江苏省基础地理信息中心, 南京 210013)

摘要:石膏是一种重要的矿产资源,但石膏矿的大量开采会产生严重的采空塌陷隐患。目前关于石膏矿采空塌陷的研究多集中于采空区矿柱和护顶层的稳定性等方面,有关矿区采空塌陷地表变形及监测预报方面的研究甚少,也缺乏有效的研究方法。针对石膏矿开采后地面变形特征及塌陷特征研究,通过对矿区 InSAR 监测数据进行地表变形分析,确定了采空塌陷前的地表变形特征。根据邳州平台矿和希州矿 2007—2018 年 InSAR 监测数据进行计算分析,可以看出地面塌陷前,地表存在早期缓慢变形,可根据变形量及范围判断塌陷类型及范围。对 InSAR 监测数据的计算和分析可为矿区地面塌陷地质灾害的监测、预报及防治提供数据资料与科学依据。

关键词: InSAR 监测数据; 邳州石膏矿区; 采空塌陷

中图分类号: P642.26; X87; P694

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2020)04-0112-06

0 引言

石膏是一种重要的矿产资源,对地方经济发展可起到极大的推动作用。但石膏矿的大量开采,在带来经济效益的同时,也留下了严重的采空地面塌陷隐患。目前关于石膏矿采空塌陷的研究多集中于采空区矿柱和护顶层的稳定性等方面,如邹洋等^[1]、章求才等^[2]、李明等^[3]、夏开宗等^[4]、陈从新等^[5]从石膏矿矿柱、护顶层及上覆岩层的力学性质及冒落规律方面对石膏矿采空区稳定性和塌陷机理进行了研究,闫士民等^[6]、刘爱斌等^[7]、周丹等^[8]对邳北石膏矿区采空塌陷特征、稳定性及监测预警等方面进行了研究,卢毅等^[9]、郑茂兴等^[10]对地面变形及石膏矿区监测监控技术等方面进行了研究。近年来,InSAR 在城市地面沉降监测、山体滑坡监测及矿区沉降监测等方面应用广泛^[11-14],但由于石膏矿的开采方式、塌陷机理与地表变形特征等因素有关,InSAR 应用于石膏矿区地表变形方面的研究较少。本文在前人对石膏矿采空塌陷特征、采空区稳定性和塌陷机理等研究的基础上,基于 InSAR 监测数据

计算分析了邳州石膏矿区采空塌陷特征并验证了其有效性。

1 研究区概况

邳州石膏矿区位于邳州市北部,呈 NW 向条带状,横跨邢楼、岔河、四户、邹庄和铁富 5 个镇,面积 47.3 km²左右。矿区地理坐标为 117°48′~118°03′E, 34°33′~34°39′N。其中,平台矿和希州矿位于邳北石膏矿区西部。

邳州石膏矿区是江苏省重要的石膏产地,其查明资源总量超过 44 亿 t,其中控制的储量达 16 亿 t,居华东地区之首。其矿床埋藏浅,开采技术条件简单。自 1984 年第一家石膏矿投产后,近 30 多年来,石膏矿的大量开采引发了严重的采空塌陷。2005 年 3 月邳州石膏矿区发生了第一起采空塌陷,之后连续多年都有采空塌陷的发生,至今已发生 23 处采空塌陷。塌陷频率不断加快,规模不断扩大,造成矿井报废、土地损毁等严重后果,对研究区人民的生命及财产安全产生了较大威胁。

收稿日期: 2019-09-12; 修订日期: 2019-09-27。

基金项目: 江苏省地质矿产勘查局科研项目“邳北石膏矿示范区采空地面塌陷远程监测预警(编号: 2019KY06)”及江苏省测绘地理信息局科研项目“江苏省 InSAR 地面沉降监测成果专题应用研究(编号: JSCHKY201803)”联合资助。

第一作者简万数据(1983—),男,工程师,主要从事水文地质、工程地质、环境地质和地质灾害防治工作。Email: tangzhigangrw@163.com。

2 研究区地质条件

2.1 地质构造

研究区大地构造位置处于中朝准地台—淮河台坳—淮北台陷褶皱—徐州(宿县)弧形断褶带中的四户凹陷。区域地层岩性主要为太古宇泰山群片麻岩,新元古界青白口系土门群—震旦系石英砂岩、石英岩及页岩,新元古界震旦系赵圩组—张渠组碳酸盐岩,古生界寒武系—奥陶系碳酸盐岩与碎屑岩,中生界白垩系青山组—王氏组碎屑岩及火山碎屑岩和新生界古近系官庄组—大汶口组含盐碎屑岩。另外,第四系分布广泛,厚度为40~45 m。

2.2 工程地质条件

全新统(0~4 m)岩性以灰黄、褐黄色亚黏土和

粉质黏土为主,底部为灰黑色黏土;中、上更新统(4~27 m)岩性主要为棕黄、褐黄色含钙质结核黏土,局部含较多的铁锰结核,中下部夹中—细砂层;下更新统(27~40 m)岩性为棕褐色黏土、粗砂和砾石层。

石膏矿赋存于古近系大汶口组下段地层中,根据石膏矿层分布特征,可分为3个含膏岩带(层),编号分别为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ,其中Ⅲ膏带是整个研究区的开采矿层。研究区内顶板埋深46~152 m,膏层厚12.15~14.05 m。矿层顶板岩性主要为泥岩、砂质泥岩和含膏泥岩,局部地段有粉砂岩、细砂岩及含砾砂岩;矿层底板岩性主要为泥岩。邳州石膏矿区岩土层力学性质指标见表1。

表1 邳州石膏矿区岩土层力学性质指标						
Tab.1 Physical properties index of rock and soil in Pizhou gypsum mining area						
时代	岩性	密度/(g·cm ⁻³)	孔隙比	内摩擦角/(°)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
Q	粉质黏土	2.09~2.12	0.46~0.55	28		
	含钙质结核黏土	2.01~2.02	0.67~0.68	17~29		
	中砂	1.94	0.58	40		
	粗砂	2.13	0.37	44		
E	泥岩、含膏泥岩	2.38~2.42		34~36	4.40~13.00	0.44~0.64
	含砾砂岩	2.46~2.70		37~44	3.26~10.60	0.30~0.87
	膏岩	2.26~2.48		38~39	19.76~36.87	0.44~1.76

2.3 水文地质条件

邳州平台矿和希州矿地质环境条件见图1。矿

区及周边地下水主要为松散岩类孔隙水,赋存于全新统、上更新统和中更新统砂层和砾石层中,局部

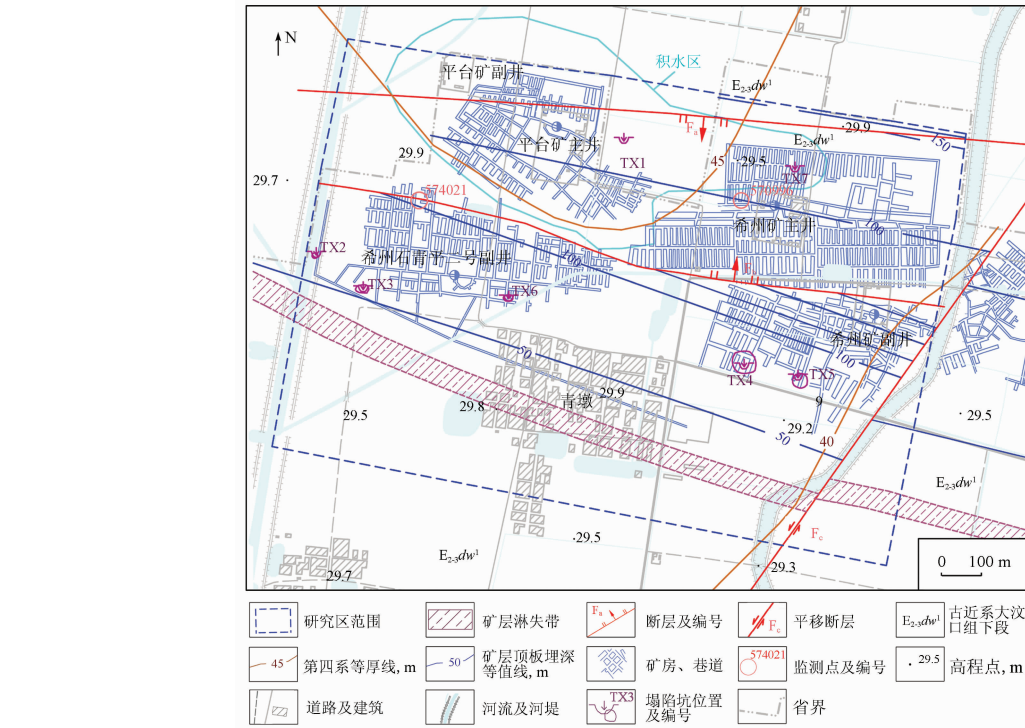


图1 邳州平台矿和希州矿地质环境条件图

Fig.1 Geological conditions of Pingtai and Xizhou mine in Pizhou

万方数据

具承压性质。第四系孔隙含水层上部为全新统棕黄色粉质黏土,中夹砂层,富水性相对较弱,单井涌水量 $<40\text{ m}^3/\text{d}$;中部为中更新统粉质黏土,中夹砂层或含砾砂层,富水性中等;底部局部地段为厚 $1\sim5\text{ m}$ 的中更新统粗砂和砾石层,富水性较好。部分矿段钻孔抽水试验结果为:降深 $2.86\sim6.84\text{ m}$,涌水量 $556.8\sim749.95\text{ m}^3/\text{d}$,单位涌水量 $1.17\sim2.597\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$,渗透系数 $2.73\sim13.0\text{ m}/\text{d}$ 。



(a) 平台矿主井面状地面塌陷(TX1)



(b) 希州石膏矿点状地面塌陷(TX5)

图 2 研究区地面塌陷现状

Fig.2 Ground collapse situation in the study area

表 2 研究区采空塌陷基本特征

Tab.2 Characteristics of gob collapse in the study area

编号	名称	基本特征	塌陷时间
TX1	平台矿主井塌陷	初期表现为大面积地面沉降变形,出现地裂缝,地表无积水,随时间推移在盆地内出现点状地面塌陷,后出现积水,总面积约 300 亩。目前塌陷区呈盆地状,低洼处有 5 个积水区	2012-04-15
TX2	运女河东岸塌陷	近圆形,初始直径 5 m,深 4 m,面积 75 m^2 ;最终直径 15 m,面积 160 m^2	2006-01-31
TX3	希州矿二号副井地面塌陷	近圆形,初始直径 6.4 m,深 5 m,面积 130 m^2 ;最终直径 34 m,面积 572 m^2	2007
TX4	希州矿副井地面塌陷	近圆形,初始直径 $3\sim5\text{ m}$,深 $5\sim6\text{ m}$,面积约 50 m^2 ;最终直径 68 m,面积 $2\,842\text{ m}^2$ 。周边见地裂缝	2011-08-25
TX5	希州石膏矿塌陷	近圆形,直径约 39 m,深约 5 m,面积 $1\,108\text{ m}^2$ 。未见地裂缝,有积水	2015-03-16
TX6	希州石膏矿 2#副井东南塌陷	长轴近东西走向,长约 15 m,短轴长约 12 m。地面下约 6 m 有积水,积水浑浊,推测塌陷坑深约 $8\sim10\text{ m}$,不能清晰看见坑底,坑壁近直立	2017-05-17
TX7	希州石膏矿主井北塌陷	近似椭圆的塌陷盆地,面积约 $15\,300\text{ m}^2$,塌陷盆地东西向长轴长约 150 m,短轴长约 120 m,最大深度 6 m 左右,局部积水,塌陷盆地四周地面出现多条环状裂缝,裂缝宽度约 $0.5\sim20\text{ cm}$,塌陷盆地内为农田	2016-11-27 2017-07-03

陷发生时,处于矿房开采时期,塌陷前先出现顶板冒落,随后有泥水渗入矿房,封堵无效后进行封堵矿房处理,塌陷坑平面近圆形,塌陷稳定后至今未继续塌陷。其余塌陷皆发生于停采后,其中 TX1、TX7 塌陷发生后,周边先后发生多次塌陷且范围逐渐扩大,目前已连为一体。

3.2 沉陷机理及塌陷特征

石膏矿被开采以后,采空区域周围岩体的原始

3 开采沉陷机理

3.1 塌陷历史

据前期资料得知,邳州石膏矿区共发生过地面塌陷 23 次,其中平台矿和希州矿共发生过地面塌陷 7 次,占整个矿区的 30%,发育面状地面塌陷和点状地面塌陷(图 2,表 2)。其中 TX2、TX3、TX4 塌

应力平衡状态受到破坏,应力重新分布。在应力达到新的平衡过程中,采空区上覆岩层由下至地表产生连续的移动、变形和非连续的破坏(开裂、冒落等),这种现象称为“开采沉陷”^[15]。因此,开采沉陷是有关岩层移动造成的。

邳州石膏矿区各矿山均采用房柱式开采,采场的稳定性依靠留设的连续矿柱和预留的石膏护顶层及护底层来维持。采空区失稳的模式有 2 种:一

是矿柱失稳,顶板岩石破坏;二是矿柱稳定,顶板岩石破坏。

房柱式开采的石膏矿开采沉陷变形不同于长壁式开采的煤矿沉陷变形特征,一般表现为 3 个阶段:护顶层的弯曲下沉、矿柱底板失稳变形和后期压密变形阶段。根据地表变形速率可以将 3 个阶段相应划分为早期缓慢变形阶段、快速变形阶段和后期稳沉阶段。

当矿柱稳定,顶板岩石破坏时,顶板岩石冒落,最终变形反映至地表,形成点状塌陷。此类塌陷早期变形范围及变形值均较小。

当矿柱失稳,顶板岩石破坏时,顶板岩石冒落,最终变形反映至地表,形成面状塌陷。此类塌陷变形范围及变形值较点状塌陷更大。

4 塌陷特征分析

4.1 InSAR 数据处理

基于多主影像相干目标小基线 InSAR 技术,利用矿区 2007—2018 年中等分辨率 SAR 影像,开展研究区地面沉降变形监测。由于石膏矿开采沉陷具有大变形的特征,且研究区潜水位较高,发生沉陷后地表易出现集水坑,故采用的 InSAR 数据监测点属于矿区内相干性良好地区。各期数据基本情况见表 3。

表 3 各期数据基本情况

Tab.3 List of basic data for each period

期次	数据类型	分辨率/m	获取期数
2007—2011	ALOS PALSAR	15	15 ~ 21
2012—2015	Radarsat - 2	25	25
2016—2018	Sentinel - 1A	20	73

地表沉降信息提取方法主要包括以下步骤。

(1)数据预处理。对 SAR 数据,根据小基线组合原则,形成若干个主辅干涉像对,依次进行粗配准、精配准、生成干涉图、去平地相位、去地形相位等处理,生成差分相位图。

(2)时间序列 InSAR 地表形变反演处理。利用预处理后的时间序列 SAR 影像开展地表沉降反演监测分析数据用 InSAR 形变监测软件系统

GDMSI 完成。依次进行稳定点目标提取、Delaunay 三角网建立、线性形变估计、非线性形变和大气相位的分离与估计、总形变量估计等处理^[16]。数据预处理和时间序列 InSAR 地表形变反演处理过程如图 3 所示。

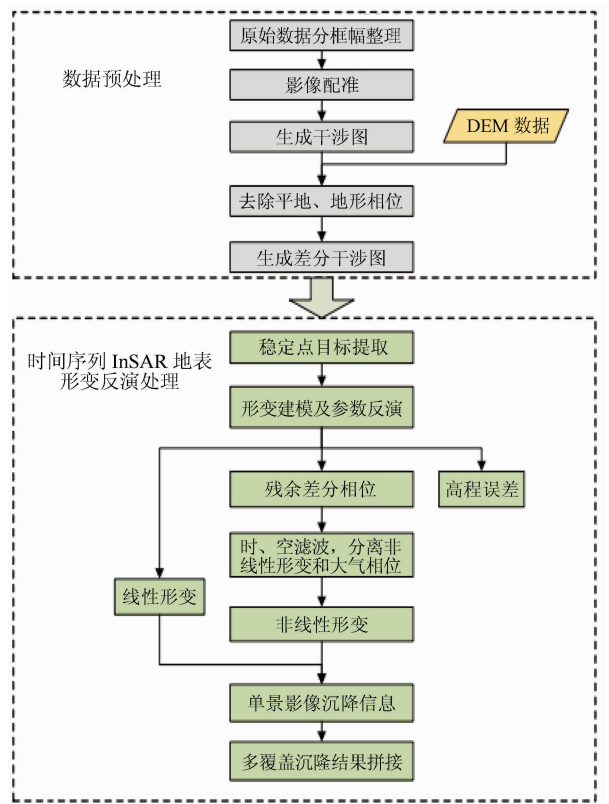


图 3 InSAR 数据预处理及地表形变反演处理过程

Fig. 3 Preprocessing and surface deformation inversion process of InSAR data

SAR 影像经过预处理、线性形变反演、非线性估计、累计形变量计算等处理步骤后^[17],通过对 InSAR 沉降监测结果进行科学验证、分析、评价,同时利用 GIS 分析技术,结合基础地理信息数据和 2007—2018 年历史沉降数据,得出各阶段的沉降速率和累计沉降量。

2007—2018 年平台矿和希州矿 InSAR 监测数据处理结果见图 4,其中,570996、574021 监测点 2012—2015 年累计沉降量曲线见图 5。

通过数据分析,570996、574021 监测点 2012—2015 年累计沉降量分别达到 -36.98 mm 和 -60.18 mm。监测点南侧区域 2016—2018 年累计沉降量分别达到 -38.53 mm 和 -77.16 mm。

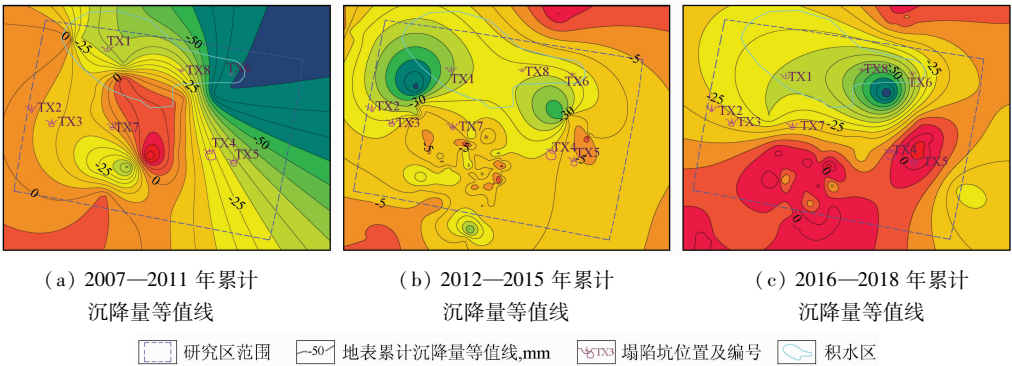


图 4 平台矿和希州矿 2007—2018 年累计沉降等值线
Fig. 4 Contour map of accumulated settlement of Pingtai and Xizhou mine from 2007 to 2018

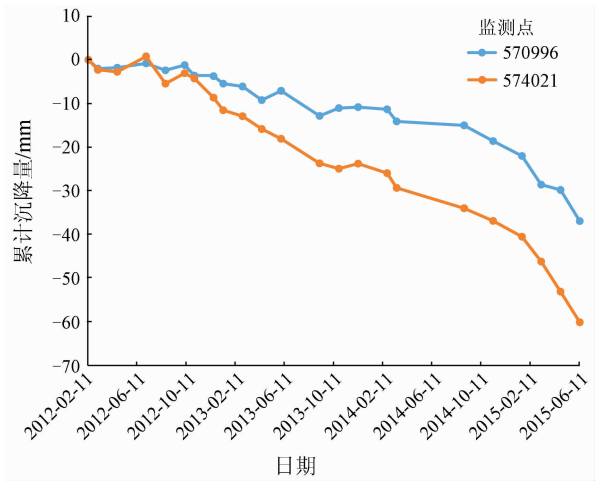


图 5 监测点 2012—2015 年累计沉降量曲线
Fig. 5 Cumulative settlement curve of monitoring points from 2012 to 2015

4.2 InSAR 数据地表变形分析

对研究区 2007—2018 年 InSAR 监测数据进行分析,结合研究区数次塌陷基本特征,认为面状地面塌陷和点状地面塌陷具有高度一致性(表 4)。

根据 TX1 和 TX7 塌陷变形过程,结合 2007—2018 年 InSAR 监测数据可以看出:TX1 点发生地面塌陷

前,2007—2011 年 InSAR 监测数据反映出地表存在早期缓慢变形,最大变形量约 -35.26 mm ;TX7 点发生地面塌陷前,2012—2015 年 InSAR 监测数据亦反映出地表存在早期缓慢变形,最大变形量约 -31.21 mm 。

2012 年后 TX1 点塌陷范围随着地表变形范围和累计沉降变形量的增大而逐渐增大,2016 年后 TX7 点塌陷范围亦随着地表变形范围和累计沉降变形量的增大而逐渐增大,最终 TX1 点和 TX7 点合并为一个大的塌陷区域。根据 2016—2018 年 InSAR 监测数据可以看出, TX1 和 TX7 点南侧仍有较大的缓慢变形量,可能引发新的塌陷,原地面塌陷范围可能会进一步扩大。

从 2007—2018 年 InSAR 监测数据还可以看出:点状塌陷时,地表早期缓慢变形范围主要集中于塌陷范围,对塌陷范围外围影响甚微;面状塌陷时,地表早期缓慢变形范围略大于塌陷范围,存在一定的塌陷影响区,随着地表变形范围和累计沉降变形量的增大,塌陷范围也会逐渐增大至地表早期缓慢变形范围,直至塌陷稳定。

由此可见,根据地表早期缓慢变形量及范围可以判断地面塌陷类型及范围。

表 4 研究区 InSAR 数据地表变形分析
Tab. 4 Surface deformation analysis table of InSAR data in the study area

编号	塌陷时间	数据时间	顶板埋深/m	与塌陷点 距离/m	沉降速率/ ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	累计沉降量/ mm	塌陷类型
TX1	2012-04-15	2007—2011	70 ~ 140	塌陷范围	$-7.05 \sim -2.86$	$-35.26 \sim -4.19$	面状
		2012—2015		120	-14.88	-52.22	
		2016—2018		230	-9.47	-38.53	
TX2	2006-01-31		60				点状
TX3	2007		53				
TX4	2011-08-25		80				
TX5	2015-03-16		80				
TX6	2017-05-17		70				
TX7	2016-11-27	2012—2015	100 ~ 140	30	-9.71	-31.21	
	2016-07-03	2016—2018		55	-25.05	-77.16	面状

5 结论

(1)通过对邳州平台矿和希州矿 InSAR 监测数据进行计算分析可以看出,InSAR 数据所探测到的属于整个采矿范围内相干性良好地区,可有效测量矿区内塌陷之前地表的缓慢变形。地面塌陷前,存在一定时期的缓慢变形阶段,可通过 InSAR 数据分析并结合矿区塌陷特征确定该变形区域,并根据变形量及范围判断塌陷类型。

(2)鉴于邳州石膏矿区膏层埋深浅、上覆松散层厚度不大、房柱式开采形式等情况,采用 InSAR 数据进行采空塌陷前期缓慢变形特征研究及灾害监测、预报具有一定的有效性,此时应合理设置监测点密度。

(3)对矿区 InSAR 数据地表变形的分析可为矿区地面塌陷地质灾害的监测、预报及防治提供数据基础与科学依据。

参考文献:

[1] 邹洋,李夕兵,赵国彦,等. 石膏矿采空区上覆岩层冒落规律与危险性评价[J]. 中国安全科学学报,2011,21(2):101-108.
[2] 章求才,贺桂成,黄炳香,等. 浅埋石膏矿顶板破断机理及应用研究[J]. 采矿与安全工程学报,2018,35(4):773-779.
[3] 李明,郑怀昌,刘志河,等. 石膏长期强度对采空区稳定性的影响分析[J]. 化工矿物与加工,2010,39(2):21-23,31.
[4] 夏开宗,陈从新,刘秀敏,等. 石膏矿矿柱-护顶层支撑体系

的流变力学模型分析[J]. 岩土力学,2017,38(10):2923-2930.
[5] 陈从新. 石膏矿采空区稳定性的数值模拟研究报告[R]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2015.
[6] 闫士民,李乐功,刘保业. 江苏邳州石膏矿区采矿地面塌陷易发性模糊综合评判[J]. 地质学刊,2014,38(2):334-338.
[7] 刘爱斌,景佳俊,周丹,等. 石膏矿区采空地面塌陷易发性分区与监测预警研究[J]. 中国地质调查,2017,4(6):76-82.
[8] 周丹,景佳俊,邢雪. 江苏省邳州石膏矿区采空地面塌陷发育特征与防治对策研究[J]. 中国地质调查,2018,5(4):99-106.
[9] 卢毅,施斌,于军,等. 地面变形分布式光纤监测模型试验研究[J]. 工程地质学报,2015,23(5):896-901.
[10] 郑茂兴,于广. 监测监控技术在石膏矿采空区的应用[J]. 化工矿物与加工,2012(9):44-46.
[11] 李达,邓喀中,高晓雄,等. 基于 SBAS-InSAR 的矿区地表沉降监测与分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2018,43(10):1531-1537.
[12] 胡波,汪汉胜. 二轨法 DInSAR 技术监测城市地表沉降[J]. 测绘工程,2010,19(2):37-41.
[13] 张洁,胡光道,罗宁波. InSAR 技术在滑坡监测中的应用研究[J]. 工程地球物理学报,2004,1(2):147-153.
[14] 邓喀中,姚宁,卢正,等. D-InSAR 监测开采沉陷的实验研究[J]. 金属矿山,2009,39(12):25-27,120.
[15] 何国清,杨伦,凌虞娣,等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1991.
[16] 范雪婷,李明巨,张大骞,等. 基于多主影像相干目标小基线 InSAR 技术的无锡市地表沉降监测[J]. 现代测绘,2018,41(3):1-5.
[17] 张永红,吴宏安,康永辉. 京津冀地区 1992-2014 年三阶段地面沉降 InSAR 监测[J]. 测绘学报,2016,45(9):1050-1058.

Analysis of gob collapse characteristics in gypsum mine based on InSAR monitoring data—A case study of Pizhou Pingtai and Xizhou mine

TANG Zhigang¹, JING Jiajun¹, YAN Shishun¹, PAN Jiubao², LI Mengmeng²
(1. The 5th Team, Jiangsu Bureau of Geology and Mineral Resources, Xuzhou 221004, China;
2. Basic Geographic Information Center of Jiangsu Province, Nanjing 210013, China)

Abstract: Gypsum is an important mineral resource. Bulk mining of gypsum will cause serious gob collapse. At present, the research on gob collapse of gypsum mine mainly focuses on the stability of pillars and top layers in the gob area. The research on the surface deformation in gob collapse areas and the monitoring and forecasting methods is rare. What's more, there is also a lack of effective methods. This article focuses on the study of surface deformation characteristics and collapse characteristics after gypsum mining. The surface deformation characteristics before gob collapse can be obtained from the InSAR monitoring data analysis on ground deformation in the mining area. According to the calculation and analysis of InSAR monitoring data of Pingtai and Xizhou mine from 2007 to 2018, it can be seen that the surface deformed gradually in the early stage before gob collapse. The deformation amount and scale can be used to analyze the gob type and scale. This research can provide data basis and scientific evidence for monitoring, forecasting and preventing ground collapse in gypsum mining area.

Keywords: InSAR monitoring data; Pizhou gypsum mining area; gob collapse