

基于 GNSS 的益新煤矿工业广场地表变形监测研究

马福义, 张 宇, 赵喜江, 于文慧

(黑龙江科技大学 矿业工程学院, 哈尔滨 150022)

摘 要:鹤岗矿区益新煤矿工业广场地表已出现影响安全生产的严重变形。为了保证工业广场在设计生命周期内的正常使用,通过对益新煤矿变形监测需求、可选技术方法等进行多方面分析,采用高精度全球导航卫星系统(GNSS)实时监测技术建立了工业广场变形监测系统,该监测系统由 2 座基准站和 12 座监测站组成。通过 2018 年 8 月 1 日至 2018 年 12 月 2 日连续 4 个月的监测发现,益新煤矿工业广场地表以新副井和东北部为中心均存在变形,整体平均向东北方向水平移动 16.7 mm,平均沉降 21.1 mm;东北部监测站 XY11 变形最大,最大水平移动为 63.1 mm,最大沉降为 69.8 mm。

关键词:工业广场;地表监测站;GNSS;变形监测

中图分类号:TD325.4 文献标识码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Surface Deformation Monitoring of Yixin Coal Mine Industry Square Based on GNSS

MA Fuyi, ZHANG Yu, ZHAO Xijiang, YU Wenhui

(College of Mining Engineering, Heilongjiang University of Science & Technology, Haerbin 150022, China)

Abstract: Serious deformation threatening safety production has occurred on the surface of Yixin Coal Mine Industrial Square in Hegang Mining Area. In this study, a deformation monitoring system was established to ensure the normal operation of the industrial square in its design lifecycle, on the analysis of deformation monitoring requirements and optional technical methods and on the high-precision global navigation satellite system (GNSS) real-time monitoring technology. The system consists of 2 reference stations and 12 monitoring stations. Through 4-month monitoring from August 1, 2018 to December 2, 2018, we found the surface deformation of Yixin Coal Mine Industrial Square centered on the new auxiliary shaft and the northeast; the overall average horizontal movement to the northeast is 16.7 mm and the average subsidence is 21.1 mm; the largest deformation occurred in the northeast monitoring station XY11, with a maximum horizontal movement of 63.1 mm and a maximum subsidence of 69.8 mm.

Key words: industrial square; surface monitoring station; GNSS; deformation monitoring

益新煤矿已开采 60 余年^[1],工业广场地表变形严重,而竖井井筒作为矿井生产的中枢系统,肩负着矿井上下运输、通风、排水等重任,极易受到地表变形的影响^[2]。除此之外,办公楼、职工宿舍、煤仓等

建(构)筑物的采动损坏也日趋严重,整个煤矿的安全生产将受到严重影响。而建(构)筑物受开采影响的损坏程度主要取决于地表变形值的大小和建筑物本身抗变形能力的大小^[3]。因此,为了保障矿井安

* 收稿日期:2021-09-27

基金项目:黑龙江省青年学术骨干项目(Hkdqg201902)

作者简介:马福义(1981-),男,辽宁鞍山人,博士,讲师,从事矿山测量、沉陷监测方面的研究工作,E-mail:mafuyi521@163.com

全生产,急需对工业广场地表进行变形监测研究,为采动沉陷治理及地表变形预计提供依据。传统变形监测方法虽施测过程简单,实测数据精度较高,但易受通视条件限制,耗费大量时间及人力成本,工作效率低,且数据处理滞后,无法做到实时监测^[4-6]。高精度全球导航卫星系统(GNSS)凭借高精度、全天候、高效率、多功能、操作简便的优势在测绘行业得到广泛应用^[7]。在变形监测中,GNSS 可提供实时的高采样率变形信息,为变形灾害预警提供理想数据源^[8]。本文利用 GNSS 实时监测技术对益新煤矿工业广场地表变形进行研究,为煤矿安全生产保驾护航。

1 工程概况

益新煤矿前身为新一煤矿(东山竖井),是新中国第一对竖井,为第一个五年计划期间,前苏联援建

中国 154 项工程之一,由苏联列宁格勒设计院设计,我国施工建成^[1,9]。煤矿位于鹤岗矿区东北部,北邻新兴煤矿,南邻南山煤矿和振兴煤矿,西邻新岭煤矿,东邻在建的鸟山煤矿,行政区属鹤岗市东山区管辖。井田走向 4.30 km,倾斜 2.94 km,面积为 12.65 km²,主井井筒净径 6 m,开采深度由矿区假定高程 293.706~ -250 m 标高。

2 变形监测方案设计

2.1 监测网设计

为了保证监测数据质量的前提下使监测站得到充分利用,根据实际情况,益新煤矿工业广场共布设 GNSS 监测基准站 2 个,即 XYJZ1 和 XYJZ2,分别位于鹤岗矿务局办公楼和振兴矿办公楼;监测站共计 12 个,即 XY1~XY12,初步组成 3 个监测断面。益新煤矿工业广场监测系统网形图,如图 1 所示。

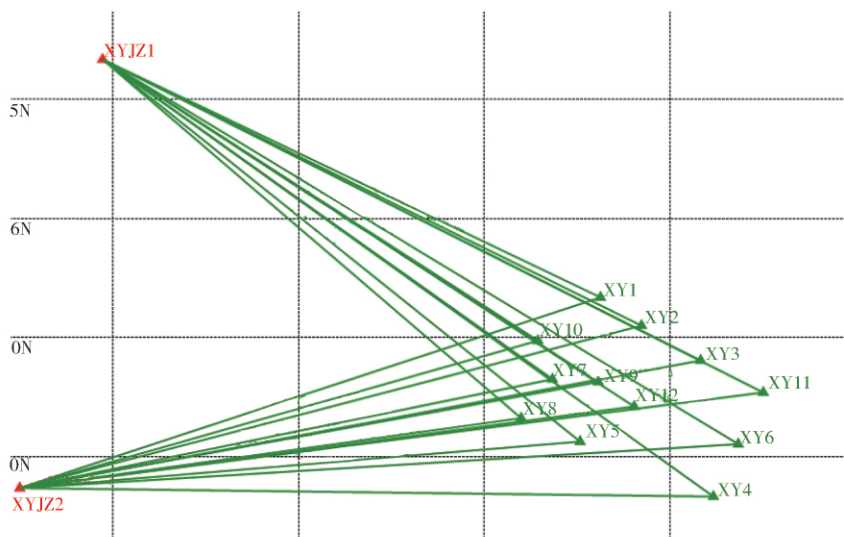


图 1 监测系统网形图

Fig. 1 Network shape of monitoring system

2.2 基准站及监测站的建立

根据已有资料,鹤岗矿区采用矿区独立坐标系,3°带高斯投影,中央子午线经度 130°16'00.28",椭球基准为北京 54 椭球。矿区内共有 C 级 GNSS 控制点 6 个,分别为:东山北山(DSBS)、鸟山(NS)、十连(SL)、朱家山(ZJS)、陆连山(LLS)、双泉岭南山(SQLNS)。此外,为提高观测精度,同时采用原峻德矿办公楼 III-3、二跨桥 III-23 两矿区水准点进行二等水准测量。

根据目前所掌握的控制点坐标,采用 D 级 GNSS 静态控制法,首先分别采用两期基线、坐标较

差、平均间隙法和尺度比参数分析法对起算控制点的兼容性进行检验,选取稳定性最好、最可靠的 SL、SQLNS 为起算点进行二维约束平差,解算出地表变形监测系统的 2 个基准站坐标,解算结果见表 1。

表 1 监测基准站坐标

Table 1 Coordinates of monitoring reference station

站点名	N/m	中误差(N)/mm	E/m	中误差 E/mm	U/m
XYJZ1	*	1.8	*	1.4	*
XYJZ2	*	2.1	*	1.6	*

注: * 表示保密数据;N、E 和 U 分别表示向北、向东和高度。

益新煤矿监测站共 12 座,自 2018 年 8 月 1 日开始运行,监测站外形及分布如图 2 所示。



图 2 监测站外形及分布

Fig. 2 Shape and distribution of monitoring stations

3 数据采集及分析

3.1 数据获取

益新煤矿工业广场地表变形监测于 2018 年 8 月 1 日起,以 XYJZ1、XYJZ2 两个基准点为起算点。为防止其他监测点的观测误差平差到另外的监测点上,系统采用独立基线网平差分别解算各监测点的坐标,对各监测点坐标每期南北方向移动值 X 、东西方向移动值 Y 、平面移动值 S 和沉降值 H 的累计变化量、单期变化量及移动方向进行了数据统计。本文统计分析的观测数据截止到 2018 年 12 月 2 日,以周为单位分为 18 期,监测点第 5 周变化量统计结果如表 2 所示。

表 2 第 5 周监测点坐标变化

Table 2 Coordinates of monitoring points in week 5

监测站名	2018. 8. 27—2018. 9. 2(第 5 周)							
	X		Y		H		S	
	累计/mm	本周/mm	累计/mm	本周/mm	累计/mm	本周/mm	累计/mm	本周/mm
XY1	3.0	-0.2	5.3	0.6	-8.6	-2.2	6.1	0.6
XY2	0.7	0.2	3.6	0.7	-10.5	0.5	3.7	0.7
XY3	2.1	-0.3	7.3	4.3	-9.0	2.1	7.6	4.3
XY4	0.7	-1.1	3.9	0.3	-12.7	-0.4	4.0	1.1
XY5	0.6	-0.7	3.4	0.7	-5.5	0.9	3.5	1.0
XY6	3.6	3.6	0.6	0.6	-11.7	-11.7	3.6	3.6
XY7	1.1	0.1	5.3	1.8	-14.9	-1.8	5.4	1.8
XY8	0.3	0.1	2.5	-0.3	-11.6	-3.7	2.5	0.3
XY9	0.9	-0.3	2.4	1.2	-8.2	-1.4	2.6	1.2
XY10	0	-5.4	5.1	10.4	-5.8	7.8	5.1	11.7
XY11	9.4	3.7	8.7	3.8	-19.0	-3.9	12.8	5.3
XY12	3.1	0.1	1.8	-0.9	-10.0	-3.1	3.6	0.9

3.2 可靠性分析

选取 2018 年 8 月 5 日至 2018 年 11 月 25 日的监测数据,计算 X 、 Y 、 S 和 H 的累计变化值,并计算 x 轴、 y 轴和 h 轴的坐标差 m_x 、 m_y 和 m_h ,评定解算精度,解算结果见表 3。

表 3 解算精度统计

Table 3 Calculation accuracy statistics

误差	解算精度统计值		
	m_x /mm	m_y /mm	m_h /mm
Max	49.8	49.8	49.5
Min	0.1	0.1	0.1
Avg	1.2	1.2	1.1

解算中误差平均值均满足《建筑变形测量规范》中三等变形测量精度指标,因此可以判断解算精度是可靠的。

为进一步验证监测系统高程测量的可靠性,将井塔监测站点和相应的塔底沉降监测点的二等水准所测结果进行对比分析,如表 4 所示。监测系统和

二等水准所测高差差异量在 10 mm 内,因此可以判断系统高程解算质量可靠。

表 4 监测站高程可靠性分析

Table 4 Elevation reliability analysis of monitoring stations

系统解算		自测解算		高差差异量/mm
监测站名	H /mm	监测站名	H /mm	
XY5	-8.7	XY5	-2.9	5.8
XY7	-9.4	XY7	-8.9	0.5

3.3 数据分析

三等变形测量相邻两期监测点变形分析可通过比较相邻两期的变形量与测量的极限误差来进行。当变形量小于测量极限误差时,可认为该监测点在此期间没有变形或变形不显著,反之则发生变形,取二倍中误差为极限误差^[10]。根据表 3 经计算可得出,观测期内 X 分量及 Y 分量的极限误差为 2.4 mm,平面移动值 S 的极限误差为 3.4 mm, H 分量的极限误差为 2.2 mm。

3.3.1 移动分量变形统计分析

为形象分析工业广场各监测站的总体变形,在此对 ΔX 、 ΔY 、 ΔH 及 ΔS 四个分量分别进行了统计分析。各监测站南北(X)方向移动值如图 3 所示。在南北方向上,XY2、XY8 的移动值不超过极限误差 2.4 mm;XY4、XY5、XY6、XY7 的移动值略大于极限误差;其余监测站均远超极限误差,在南北方向上均发生了移动。工业广场保护煤柱边界线东北部的 XY3、XY11 的移动量均大于 10 mm,变形量最大为 48.7 mm。

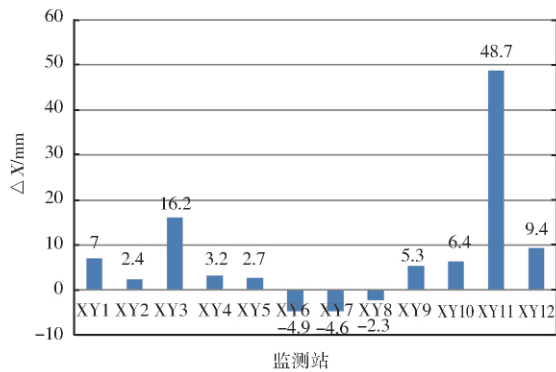


图 3 南北方向移动值

Fig. 3 Movement value in the north and south direction

各监测站东西(Y)方向上移动值如图 4 所示。在 Y 方向上,12 个监测站的移动值均大于极限误差 2.4 mm。除工业广场东部 XY10 外,其余各站均向东移动;北侧小煤矿监测线上的 XY1、XY2、XY3、XY11 的累计移动量均超过 10 mm,移动量最大测点为 XY11,累计向东移动 40.1 mm。

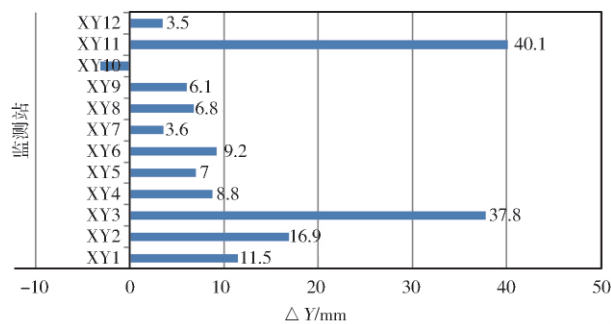


图 4 东西方向移动值

Fig. 4 Movement value in the east and west direction

综合 X 方向和 Y 方向移动量,得到各监测站平面移动值 S 的变化,如图 5 所示。各监测站的平面移动量 S 均大于极限误差 3.4 mm,平均移动值为 16.7 mm。移动值最大测点为位于东北侧泰源煤矿开采边界和保护煤柱之间的 XY3 和 XY11,最大水平移动值为 63.1 mm。工业广场内部的 XY5、XY7、XY8、XY9 的移动量较小。

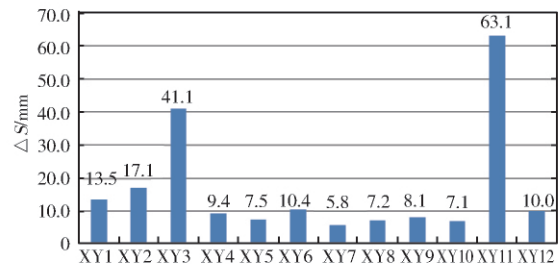


图 5 平面移动值

Fig. 5 Plane movement value

各监测站竖直方向上沉降值及部分监测站沉降时间序列,如图 6 和图 7 所示。在 H 方向上,12 个监测站沉降值均大于极限误差(2.2 mm),累计沉降平均值 21.1 mm。工业广场内部的 XY5、XY9、XY12 沉降量均小于 10 mm;位于新副井井塔顶部的 XY7 监测点累计下沉 20.5 mm;东北部监测站 XY1、XY2、XY3、XY6、XY11 沉降量较大,最大沉降量达 69.8 mm。

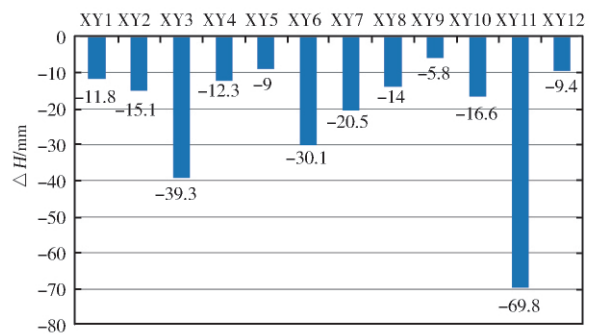


图 6 沉降值统计

Fig. 6 Subsidence statistics

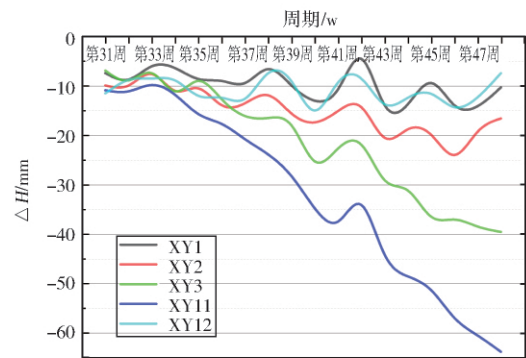


图 7 部分监测站沉降时间序列

Fig. 7 Time series of subsidence of some monitoring stations

统计所有监测站周沉降数据以便于精准分析观测周期内各监测站协同沉降情况及单站沉降趋势,选取偶数观测周进行统计,结果如图 8 所示。从总体来看,各监测站基本同步下沉。除东北侧监测站 XY3、XY11 仍具有持续下沉趋势外,其余各站下沉趋势趋于平稳。

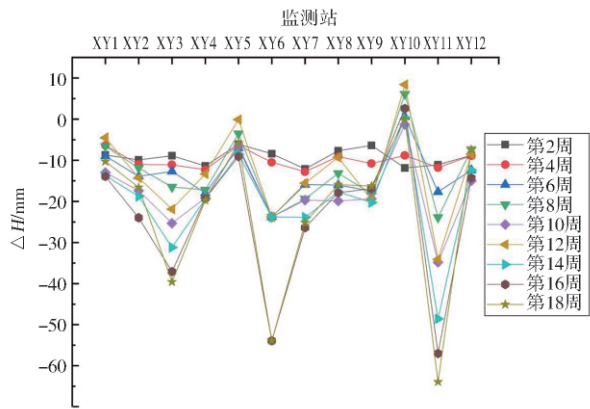


图 8 偶数观测周监测站沉降值

Fig. 8 Subsidence of monitoring stations in even observation weeks

3.3.2 整体变形分析

为了进一步从整体上分析工业广场变形情况，

本文根据统计数据，结合工业广场平面图，以四参数纠正 19 级分辨率影像为背景，绘制出地表下沉值及下沉速率等值线图、地表移动值及移动矢量图、地表下沉 3D 模型及沉降趋势图，得到矿区独立坐标系下的图。以累计下沉量 2 mm 为等高距得到累计下沉等值线图，以周下沉速率 0.1 mm/周为等高距得到下沉速率等值线图，如图 9 所示。综合来看，地表下沉值与下沉速率等值线基本相符，工业广场整体同步下沉。选煤厂 XY9 附近区域下沉量小，XY1、XY12、XY4 连线以东下沉逐渐加剧；此外，新副井周边区域下沉量也较大，应引起关注。井塔附近的沉降速率在 -0.6 mm/周至 -1.0 mm/周之间；自选煤厂起向其东北方向下沉速率明显递增，XY11 监测站附近区域下沉速率达到 -3.8 mm/周。

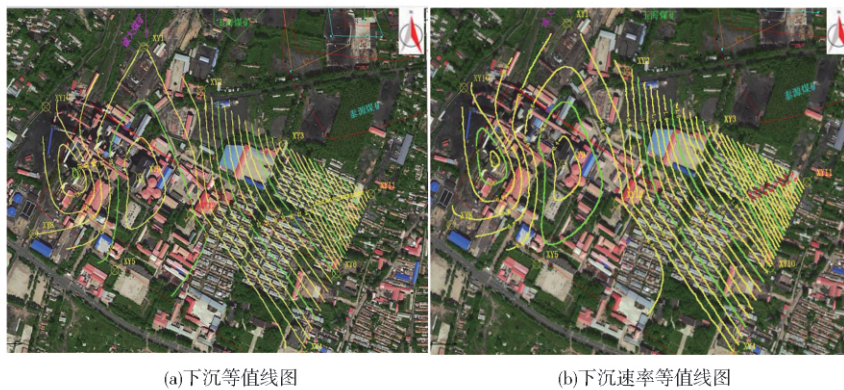


图 9 地表下沉值及下沉速率等值线图

Fig. 9 Contour map of surface subsidence and subsidence rate

根据益新煤矿地表各监测点累计下沉量绘制出可直观反映地表累积的 3D 模型及沉降趋势图，如图 10 所示。从整体下沉趋势来看，工业广场中心区

域下沉不明显，西侧下沉以新副井为中心，东北部区域向隆源煤矿边界和采空区一侧下沉量较大。

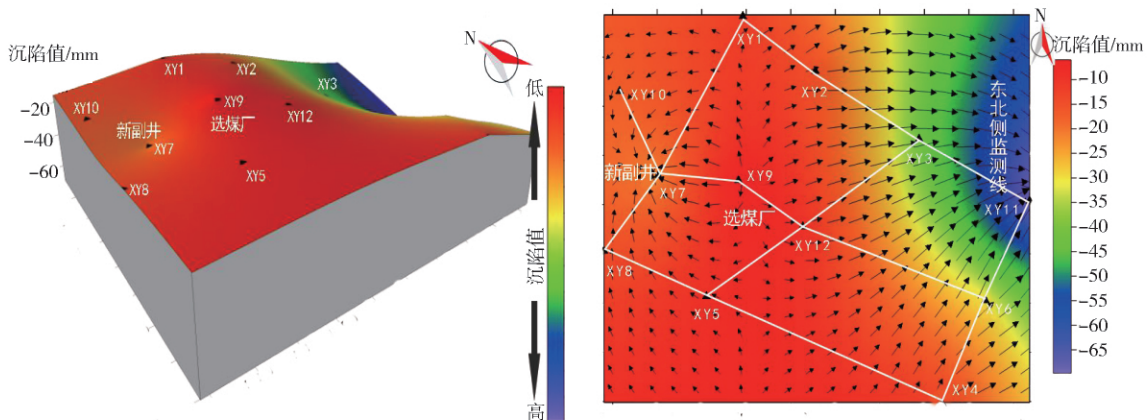


图 10 地表下沉 3D 模型及沉降趋势图

Fig. 10 3D model of surface subsidence and subsidence trend

以水平移动 1 mm 等高距绘制出水平移动等值线图，基于监测站分布及移动值绘制出地表移动矢

量图，见图 11。益新煤矿工业广场地表水平移动等值线与下沉等值线大致相符，除西南侧 XY8、XY7

及XY6向东南方向移动外,其余向东北方向移动,且东北部区域移动量较大。

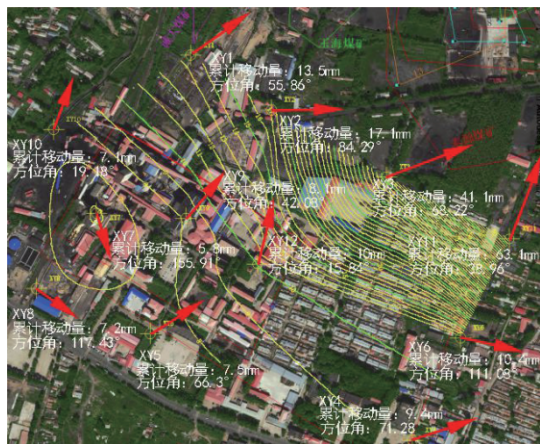


图 11 水平移动矢量图

Fig. 11 Horizontal movement vector diagram

4 结论

通过对益新矿工业广场自2018年8月1日至

2018年11月2日的监测数据进行统计分析,得出以下结论:

1) 益新煤矿工业广场地表出现以新副井和东北角为中心的双中心变形。其中,东北角变形量较大,位于东北角的XY11监测站向东北方向水平位移63.1 mm,沉降69.8 mm。

2) 在竖直方向,工业广场总体呈现下沉趋势,平均累计下沉21.14 mm。小煤矿开采边界至工业广场保护煤柱边界之间区域下沉量较大,XY11监测站区域最大下沉量达69.8 mm,并有持续下沉趋势。

3) 水平方向上的移动基本遵循沉降规律,新副井周边区域以其为中心移动;工业广场北侧紧邻小煤矿开采边界区域向东北方向移动,其中XY3累计移动量达37.8 mm,XY11累计移动量达40.1 mm。

参考文献:

- [1] 张春. 益新矿井瓦斯地质规律与瓦斯预测[D]. 焦作: 河南理工大学, 2012.
- [2] 王凤志. 荆各庄矿工业广场煤柱开采变形监测研究[J]. 矿山测量, 2019, 47(4): 13-20.
WANG F Z. Research of ground movement monitor of industrial square pillar mining of Jinggezhuang[J]. Mine Surveying, 2019, 47(4): 13-20.
- [3] 阎跃观, 师晓波, 刘吉波, 等. 矿区地表与建(构)筑物移动变形关系实测研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 158-165.
YAN Y G, SHI X B, LIU J B, et al. In-site monitoring study on relationship between movement and deformation of surface and buildings in mining area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10): 158-165.
- [4] 张洪胜, 刘浩. 矿山开采地表沉降监测方法探讨[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(8): 200-202.
ZHANG H S, LIU H. The exploration on the methods of monitoring in coal mining subsidence[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2014, 37(8): 200-202.
- [5] 梁涛. 基于GPS技术的矿区变形监测研究[J]. 测绘通报, 2013(S1): 26-28.
- [6] 姚未正, 徐克科, 刘吉鹏, 等. 位错模型的矿区地表沉降监测[J]. 测绘科学, 2021, 46(3): 32-39.
YAO W Z, XU K K, LIU J P, et al. Surface subsidence monitoring in mining area based on dislocation model[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(3): 32-39.
- [7] 胡羽丰. 全球高精度对流层延迟建模及其在地基GNSS技术中的应用研究[J]. 测绘学报, 2020, 49(4): 535.
HU Y F. Research on the establishment of global tropospheric delay model with high precision and its applications in ground-based GNSS techniques[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(4): 535.
- [8] 段伟, 王敏, 吴昊, 等. 基于LWR-Pettitt算法的GNSS变形信息的识别与预警[J]. 测绘通报, 2021(5): 124-128, 154.
DUAN W, WANG M, WU H, et al. Recognition and early warning of deformation information in GNSS coordinate series based on the LWR-Pettitt method[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(5): 124-128, 154.
- [9] 孙成坤. 益新煤矿主井延深技术改造工程施工设计[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(S2): 257-258.
SUN C K. System design of retrofit engineering for main shaft extension in Yixin Mine[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(S2): 257-258.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑变形测量规范: JGJ8-2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

(编辑: 安娜)