北斗卫星系统在排土场位移监测中的应用

刘 伟[1],吴海明[1],李文星[1],沈立华[2],宋伶才[2],孙 越[2]

(1.中核沽源铀业有限责任公司,河北 张家口 076561;
2.核工业计算机应用研究所,北京 100090)

摘要:根据露天矿山排土场边坡形变监测需要,在排土场地质条件及周边环境勘察结果的基础上,应用北斗高精度定位技术,分别在排土场 1590、1586、1580 平台边坡布设 5 个北斗位移监测点,实现对排土场边坡形变的实时监测。对连续 10 个月的形变监测数据的统计分析表明,排土场施工作业导致各监测点边坡垂直方向形变,1590 平台边坡垂直形变显著(垂直形变月累积量平均约为 6.0 mm),其他平台边坡垂直形变月累积量平均值小于 3.0 mm,各监测点均未出现形变加速或阶跃变化,排土场边坡尚处于平稳期。北斗卫星系统在排土场位移监测中的应用,为边坡形变趋势预测和安全预警提供了自动化的监测手段和原始监测数据,保障了露天矿山排土场堆放作业的安全。

关键词:排土场;北斗卫星系统;位移监测;边坡形变;边坡稳定性

中图分类号:TN98 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-8063(2023)04-0058-06

DOI:10.13426/j.cnki.yky.2023.04.11

露天矿山排土场边坡稳定性是生产安全的重要影响因素。基于矿山采排规划,借助 FLAC^{3D} 数值模拟软件,研究不同工况下排土场边坡稳定性,优选了排土场设计方案及支护措施[1]。排土场边坡受岩土体重力、降雨和工程施工等因素的影响,始终处于动态变化过程中,在施工作业过程中需要时刻掌握排土场边坡的变化。传统上利用全站仪等设备进行边坡监测,该方法存在受地形影响大、投入成本高和易造成人工测量误差等问题[2]。目前,北斗高精度定位技术逐渐应用于各工程领域,在桥梁形变监测[2]、公路边坡监测[3]、大坝监测[4]、滑坡监测[5-6]等工程中,充分证明了北斗高精度定位技术的工程可行性。

为保证露天矿山排土场的安全及稳定运行,利用北斗高精度定位技术对排土场边坡形变进行高精度、全天候 24 h 无间断实时监测,自动化采集边坡形变数据、实时处理和超前预警,旨在为企业的安全管理、事故预防提供有力支撑。

1 工程概况

1.1 工程背景

某露天矿山排土场位于露天矿山西部,属构造剥蚀的低山地貌,海拔 1 500～1 600 m,属于山谷型,山坡坡度为 25～30°。沟谷横断面呈“V”型,植被较发育,主要为低矮灌木及草地;两侧山坡局部基岩裸露[7]。

排土场基底坡度 3.3°,地处沟谷,分为废石场和单钼堆。废石场位于矿山西北侧,呈“葫芦形”,占地面积约为 4.8×10^5 m^2,南北长 1 290 m,东西宽 200～550 m;废石堆积厚度 10～30 m,最高点位于北侧(标高1 594 m),最低点位于最南侧(标高 1 544 m),废石场设计的最终堆置高度为 58 m。

目前没有专门的铀矿山排土场设计规范,多参照《有色金属矿山排土场设计标准》(GB 50421—2018)进行铀矿山排土场设计。依据该标准第 3.3.1 条的规定,工程一期排土场设计总容积为 854.20 万 m^3,排土场堆置标高约 1 600 m,排土场的级别为三级[8]。

收稿日期:2023-04-24

第一作者简介:刘伟(1986—),男,辽宁绥中人,学士,工程师,主要从事地质、矿业工程等研究。

通信作者简介:孙越(1996—),女,山东济南人,硕士,工程师,主要从事核行业北斗应用、传感器研究。

1.2　监测设备

依据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)的监测要求，遵循“适用性、先进性和经济性”的原则进行监测设备选型[9]。选用具有便携性好、通用性强、可靠耐用等优势的北斗位移监测设备，支持全 GNSS 星座系统联合定位、单北斗系统独立定位等多种定位模式，具备毫米级感知位移细微变化的能力，丰富的数据接口和传输协议满足高效远程调试、平台网络接入和监测平台即时访问等使用需求。

依据露天矿山边坡区域现场环境和地质环境，在排土场标高 1 590、1 586、1 580 m 的平台(简称 1590、1586、1580 平台)边坡布设 5 个位移监测点；在无明显卫星信号遮挡的位置设立 1 个基准站，与北斗位移监测站联合，实现毫米级的边坡形变监测。

排土场布设的 5 个位移监测设备长期连续跟踪接收 GNSS 卫星信号，从可见 GNSS 卫星中优先选用北斗三号卫星播发的导航信号进行捕获、跟踪和定位解算。通过数据通讯网络实时将观测数据传输到控制中心，结合基准站的观测数据和起算坐标，通过控制中心北斗高精度定位解算软件进行实时差分处理，消除监测站与基准站之间的公共定位误差项，提高定位精度，最终得到各监测点精准的三维坐标，进而计算出监测点毫米级的位移变化量。

2　GNSS 监测数据

相关工程于 2021 年 10 月竣工并交付使用，测试和调试结果表明基准站、监测站、控制中心及相关通信网络设施运行良好。对 2022 年 1 月 1 日—2022 年 10 月 31 日排土场边坡形变自动监测数据进行绘制，得到各监测点形变过程(图 1)。

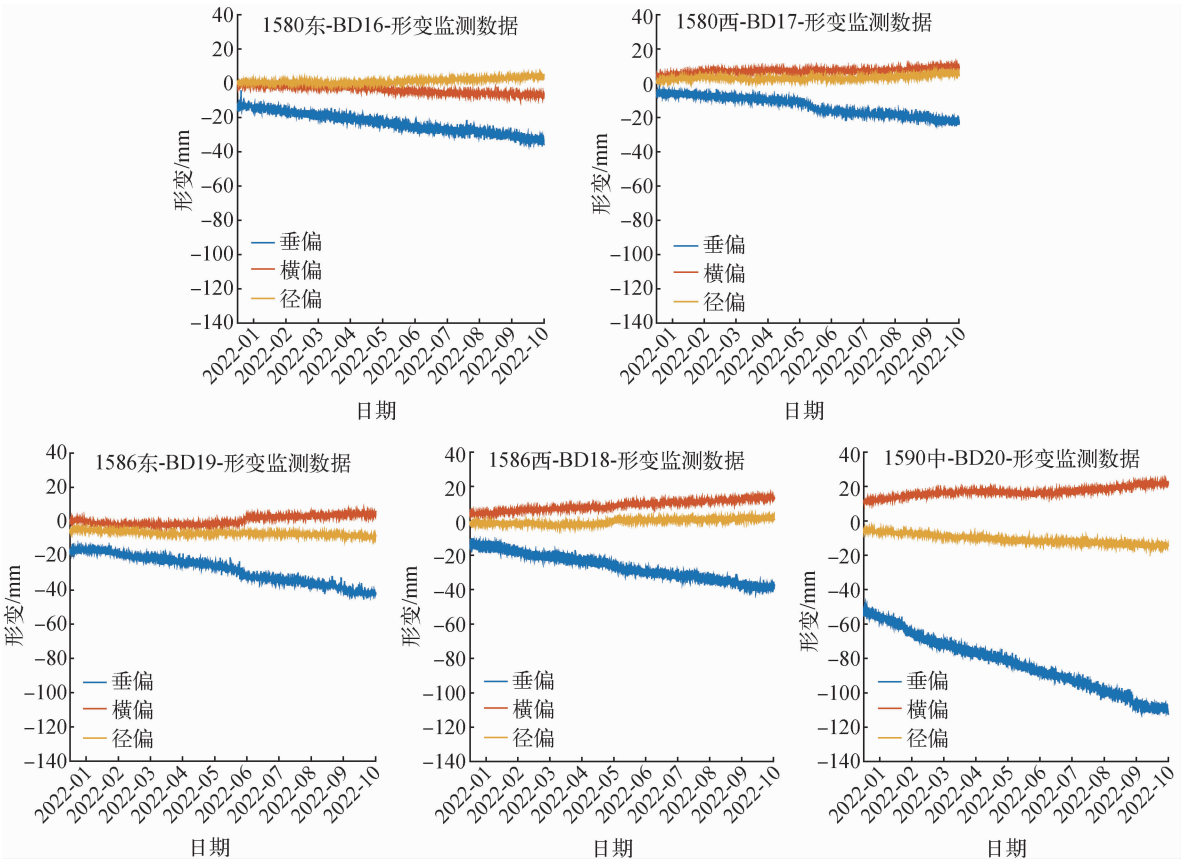


图 1　排土场北斗位移监测原始数据

Fig. 1　Original data of Beidou displacement monitoring in waste dump

各位移监测站的形变监测结果上报频率默认为 1 次/h，监测数据为当前监测站三维坐标与初始标定坐标之间的偏移量，即累积位移量。为适应排土场平面结构特点，便于评估形变趋势，将原始大地坐标系下的形变量转换为法向偏移（径偏）、切向偏移（横偏）和垂直方向偏移（垂偏）。

截止至 2022 年 10 月 31 日 24 时，排土场各监测点（1580 平台东、1580 平台西、1586 平台东、1586 平台西和 1590 平台中）的形变过程较为平稳，各监测点的形变属稳定型，变形趋势基本处于匀速变形状态；位移量基本按稳定斜率的直线演化，累积位移稳定增加，未出现急剧加速或阶跃性突变情况。因排土场施工作业，各监测点的垂直方向形变呈现持续增加的特征，垂直方向的形变速度较法向、切向的形变速度快，尤其是1590 平台中部的监测点，垂直方向的形变速度最快，累积下沉量最大。

3 监测数据处理

原始监测数据包括监测点的真实位移量和测量误差，监测数据中蕴含了丰富的边坡活动特征信息。为了更好地挖掘监测数据的价值，需对原始监测数据进行降噪、滤波处理；在此基础上对其进行特征分析，获取排土场边坡的动态演化进程信息，对边坡稳定性进行评估。

3.1 数据降噪

位移监测设备受仪器自身精度、施工安装、工作环境中的温湿度，以及操作使用等因素的影响，监测结果为随机噪声和测量真值的叠加。对监测数据进行滤波、降噪处理，可提高监测数据的信噪比，有利于特征量（形变变化趋势）的提取，提高形变预测的准确度。

因原始监测数据中未包含较大的突变成分，可采用移动平均法对监测数据进行滤波处理，降低仪器噪声和周围环境对监测数据的影响，更好地反映出各监测点的变形趋势[10]20，移动平均法处理公式为

$$\overline{S_i} = \frac{1}{N}[S_i + S_{i-1} + \cdots + S_{i-(N-1)}],$$

式中：S_i 为 i 时刻的累积位移，mm；N 为移动平均窗口长度，mm；$\overline{S_i}$ 为移动平均处理后的位移，mm。

监测数据中包含的噪声以加性平稳高斯白噪声为主，移动平均处理后的监测数据信噪比的改善程度与 N 有关[10]21。由于噪声序列间不相关，移动平均的数据窗口长度越长，噪声序列间相互抵消作用越明显，越有利于信噪比的提升；但过长的移动平均数据窗口，又会弱化真实信号序列间的快速变化特征，不利于预测模型的建立。因此，综合考虑排土场监测数据的特点，取每日采样频度 24 为移动平均数据窗口长度，计算每天的平均形变。预处理后的各监测点每日的径向偏移、横向偏移和垂直偏移见图 2。根据预处理后的结果，对各监测点典型位移量进行统计，结果见表 1。

表 1 排土场各监测点典型位移量统计

Table 1 Statistics for typical displacement of each monitoring point in the waste dump

日期	1580平台东位移/mm			1580平台西位移/mm			1586平台东位移/mm			1586平台西位移/mm			1590平台中位移/mm		
	径向	横向	垂直	径向	横向	垂直	径向	横向	垂直	径向	横向	垂直	径向	横向	垂直
01-31	0.50	−1.32	−14.66	2.32	5.49	−6.34	−5.64	−1.33	−17.06	−1.95	5.04	−16.15	−7.19	13.56	−59.20
02-28	0.72	−1.79	−17.79	3.62	7.32	−7.91	−5.71	−1.96	−20.74	−1.25	6.31	−19.80	−7.49	15.74	−68.90
03-31	−0.68	−2.19	−18.87	1.55	6.93	−8.91	−7.39	−2.10	−21.98	−2.34	7.39	−21.52	−9.59	16.53	−73.78
04-30	0.56	−2.47	−21.37	2.79	7.26	−10.01	−7.40	−1.89	−24.13	−1.71	7.68	−23.75	−9.93	17.36	−78.36
05-31	0.82	−4.46	−23.68	3.63	8.10	−15.01	−6.50	−0.43	−27.47	0.47	10.13	−28.60	−11.29	16.25	−84.95
06-30	1.69	−5.13	−26.74	2.71	7.02	−17.18	−7.25	3.02	−33.16	0.63	10.10	−30.03	−12.24	16.23	−89.73
07-31	2.64	−5.91	−27.65	3.32	7.31	−17.22	−7.06	2.97	−34.56	1.09	11.04	−32.10	−12.68	17.95	−94.11
08-31	2.91	−6.38	−30.25	4.14	8.47	−19.88	−7.74	3.74	−37.56	0.74	12.71	−35.05	−13.37	19.46	−101.13
09-30	4.11	−6.50	−32.40	5.79	9.72	−21.74	−8.48	4.32	−40.59	1.46	13.07	−38.75	−14.44	21.58	−107.76
10-31	4.33	−7.32	−33.19	5.89	9.92	−22.59	−8.87	4.15	−42.24	2.03	13.44	−39.09	−14.92	22.48	−110.66

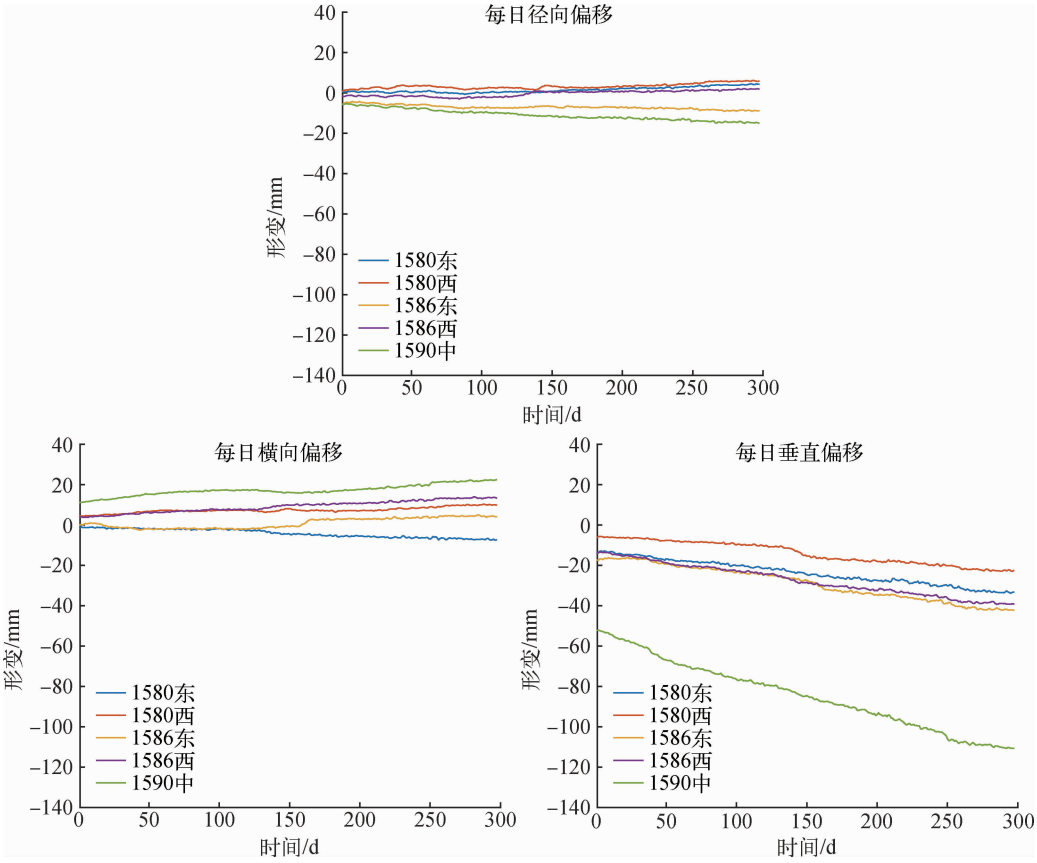


图 2　监测数据降噪预处理

Fig. 2　Monitoring data denoising preprocessing

从表 1 可看出，各监测点三方向的变形值缓慢增加，月变形变化速率也存在波动。1590平台中部监测点的形变最显著，8 月的累积形变量达 7 mm(101.13 mm－94.11 mm＝7.02 mm)。

3.2　数据拟合与预测

为定量刻画样本数据序列的变化规律，预测参数的变化趋势，对监测数据序列进行数据拟合，得到可描述时间序列的解析式，利用该解析式可计算未来时刻的形变量。

数据拟合的过程就是在某种准则下利用已有数据对解析式的参数进行估计。采用最小二乘法(Least Squares Method，LSM)，按照残差平方和最小原则，求得解析函数的最佳参数，实现监测数据的拟合处理，定量反映出样本数据的变化规律[10]22。

在最小二乘准则下进行数据拟合，原型函数为

$$y = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \cdots + a_1 x + a_0 \ ,$$

拟合过程就是利用一组长度大于指定阶次(n)的已知数据序列对多项式的系数(a)序列进行求解：

$$\begin{bmatrix} x_1^n & x_1^{n-1} & \cdots & 1 \\ x_2^n & x_2^{n-1} & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n^n & x_n^{n-1} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_n \\ a_{n-1} \\ \vdots \\ a_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \ .$$

在本工程中，已知数据序列(x)为已有的监测数据，在设定拟合曲线阶次(n)后，当各监测数据距离拟合曲线的偏差的平方和最小时，该拟合结果为最优结果。

根据监测数据预处理的结果，垂直方向的形变最显著。因此，重点对各监测点垂直形变进行数据拟合，对其未来变化趋势进行预测。取各监测点垂直方向的月形变量为已知数据序列(x)，拟合阶次(n)设为 5 阶，求得最小二乘准则下的最优多项式系数(a)，在该组系数模型下对未来 3 个月垂直方向的形变量进行推算，结果见图 3。

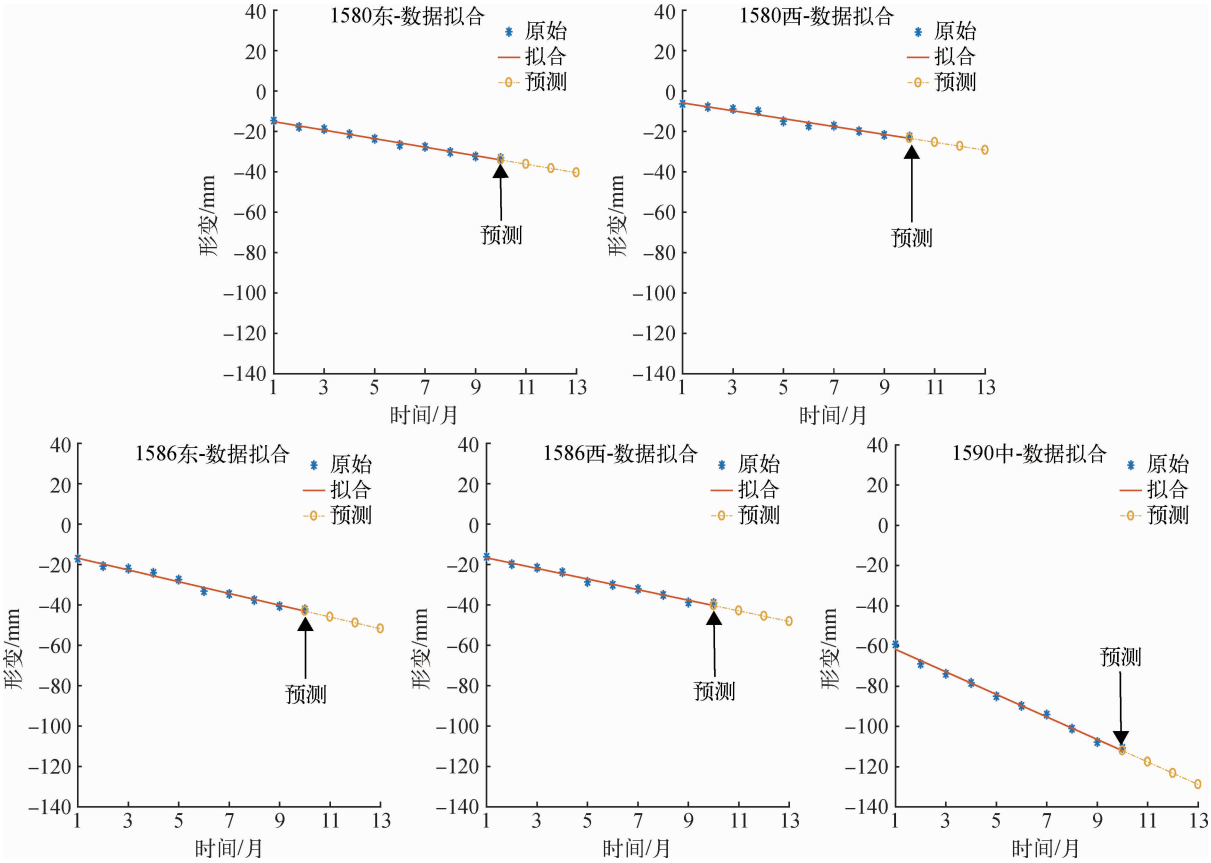


图 3 监测数据拟合与预测

Fig. 3 Monitoring data fitting and prediction

由图 3 可知，排土场施工作业使各监测点垂直方向位移处于持续下降状态，1580 平台东监测点平均每月下降 2.0 mm，1580 平台西监测点平均每月下降 1.8 mm，1586 平台东监测点平均每月下降 2.8 mm，1586 平台西监测点平均每月下降 2.6 mm，1590 平台中部监测点的下降速率最高，平均每月下降 6.0 mm。

4 结论

该露天矿山排土场边坡监测系统充分发挥了北斗高精度定位的优势，为管理部门提供了数据支撑。连续 10 个月的监测结果表明，该露天矿排土场边坡尚处于平稳期，但需增强对 1590 平台边坡的监测力度和防护措施。

通过对监测数据降噪、最小二乘拟合等处理，以最直接的边坡位移变化为基础，得到各监测点数据变化规律和趋势，可在一定程度上表征排土场边坡形变的演化规律。

参考文献：

[1] 崔帅，王大国，周裕强. 某露天采场内置排土场边坡稳定性分析及工程措施研究[D]. 绵阳：西南科技大学，2022.

[2] 李家春，宋宗昌，侯少梁，等. 北斗高精度定位技术在边坡形变监测中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报，2020，31(1)：70-74.

[3] 黄步云. 基于北斗卫星的边坡变形监测系统应用研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2019.

[4] 张济源. 基于北斗及多源数据融合的山区公路边坡变形预测研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2022.

[5] 朱真，江思义，刘小明，等. 基于广播 RTK 边缘计算的北斗高精度地质灾害监测系统及应用分析[J]. 水文地质工程地质，2021，48(5)：176-183.

[6] 许强，彭大雷，何朝阳，等. 突发型黄土滑坡监测预警理论方法研究——以甘肃黑方台为例[J]. 工程地质学报，2020，28(1)：111-121.

[7] 河北华勘资环勘测有限公司. 中核沽源铀业有限责

任公司露天采场及排土场稳定性分析报告[R]. 承德：河北华勘资环勘测有限公司，2020.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部，国家市场监督管理总局. 有色金属矿山排土场设计标准：GB 50421—2018[S]. 北京：中国计划出版社，2018.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑边坡工程技术规范：GB 50330—2013[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2014.

[10] 白天阳，兰孝奇，王德军，等. GNSS 观测中移动平均法和小波变换的滤噪效果比较[J]. 勘察科学技术，2018，217(4)：19-22.

Application of Beidou Satellite System in Waste Dump Displacement Monitoring

LIU Wei[1], WU Haiming[1], LI Wenxing[1], SHEN Lihua[2], SONG Lingcai[2], SUN Yue[2]

(1. Guyuan Uranium Industry Co., Ltd., CNNC, Zhangjiakou 076561, China;
2. Computer Application Insitute of Nuclear Industry, Beijing 100090, China)

Abstract: Based on the geological conditions and surrounding environmental survey results of the open-pit mine waste dump slope deformation monitoring, using the Beidou high-precision positioning technology, five Beidou displacement monitoring points were set up on the 1590, 1586 and 1580 platform slopes of the waste dump, and the real-time monitoring of the slope deformation of the waste dump was achieved. The statistical analysis of deformation monitoring data for 10 consecutive months shows that the construction of the waste dump has led to the vertical deformation of the slope at each monitoring point. The vertical deformation of the 1590 platform slope is significant, with the average monthly cumulant of deformation about 6.0 mm, and the average monthly cumulant of the vertical deformation of other platform slopes is less than 3.0 mm. No acceleration or step change of deformation has occurred at each monitoring point, and the waste dump slope is still in a stable period. The application of Beidou satellite system in displacement monitoring of waste dump provides automated monitoring methods and raw monitoring data for slope deformation trend prediction and safety warning, ensuring the safety of open-pit mine waste dump stacking operations.

Key words: waste dump; Beidou satellite system; displacement monitoring; slope deformation; slope stability