

# 基于地基合成孔径雷达数据的预警预报方法研究<sup>①</sup>

刘玉溪<sup>1</sup>, 杨凤芸<sup>1</sup>, 秦宏楠<sup>2</sup>

(1.辽宁科技大学 土木工程学院, 辽宁 鞍山 114051; 2.中国安全生产科学研究院, 北京 100012)

**摘要:** 针对地基合成孔径雷达数据振荡性高、波动性强、特征趋势不明显问题,提出了一种应用速度倒数指标对边坡变形进行预警预报的方法,采用错位相减、去限值数据处理方法,优化形变数据的质量,提高滑坡预警准确性、预报及时性。该方法在内蒙古某铁矿的应用结果表明,它能解决监测数据振荡性高、特征趋势弱、预报时效性差等问题,凸显临灾数据形变规律,是一种适用性很强的预警预报方法。

**关键词:** 矿山地质灾害; 地质灾害监测; 滑坡; 地基合成孔径雷达; 预警; 预报; 矿山安全; 滑坡

中图分类号: P642

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.03.008

文章编号: 0253-6099(2023)03-0033-05

## Early Warning and Prediction Approach Based on Ground-Based SAR Data

LIU Yuxi<sup>1</sup>, YANG Fengyun<sup>1</sup>, QIN Hongnan<sup>2</sup>

(1.School of Civil Engineering, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051, Liaoning, China; 2.China Academy of Safety Science & Technology, Beijing 100012, China)

**Abstract:** In view of the data of ground-based SAR presenting high oscillation and high fluctuation with less obvious characteristic trend, an approach for early warning and prediction of slope deformation by using velocity reciprocity was proposed, which adopts a data processing method of subtracting dislocations and deleting limits to optimize the quality of deformation data, thus the accuracy of early warning and timely prediction of landslide can be improved. The application of this approach in an iron mine in Inner Mongolia shows that not only those problems faced in the actual actuation can be solved, but also the data about disaster approaching can present obvious deformation rule. It is concluded that this early warning and prediction approach has a wide application.

**Key words:** mine geological disasters; geological hazard monitoring; landslide; ground-based SAR; early warning; prediction; mine safety; landslide

矿产资源的长期开采必然会在矿区地下形成大面积采空区,可能引发地裂缝、塌陷以及山体滑坡等矿山地质灾害<sup>[1-2]</sup>。矿山地质灾害严重影响矿山安全生产<sup>[3-5]</sup>。

目前,矿山滑坡预警预报已成为预防滑坡动力灾害的研究重点之一,预警准确性、预报及时性是检验预警预报效果的两个关键指标<sup>[6]</sup>。地基合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)作为一种远距离非接触式变形监测技术已广泛应用于矿山滑坡监测和预警分析<sup>[7-10]</sup>,它通过步进频率连续波技术和合成孔径雷达技术相结合获取待测物体的形变信息,实现了从传统

“点测量”方式向“面测量”方式的转变,可为判断滑坡风险提供更全面、更准确的基础数据<sup>[11-12]</sup>。

然而,地基 SAR 监测数据相比传统监测数据,具有振荡性高、波动性强的特点<sup>[6]</sup>,使得雷达形变数据的趋势性不明显,难以凸显临灾数据的演化特点和规律。本文通过地基 SAR 对内蒙古某矿山边坡监测数据采用不等周期的错位相减、速度取倒数、去限值平滑的数据处理方法处理监测数据,解决监测数据振荡性高、特征趋势弱、预报时效性差等问题,凸显临灾数据形变规律,验证了该方法在预警预报方面的适用性及准确性。

① 收稿日期: 2023-01-02

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3001900)

作者简介: 刘玉溪(1997—),男,山东日照人,硕士研究生,主要研究方向为边坡动力灾害监测及预警。

通信作者: 杨凤芸(1965—),女,辽宁鞍山人,博士,教授,硕士研究生导师,主要研究方向为边坡动力灾害监测、误差理论数据处理及分析。

## 1 速度倒数法预警原理

采用地基 SAR 对矿山边坡进行高频次数据监测时,受到气温、爆破振动、降水等外界因素的影响,获得的监测数据具有很强的波动性和振荡性,无法凸显边坡临滑阶段的形变规律。

本次实验监测边坡内变形区域的原始速度-时间序列曲线如图 1 所示。

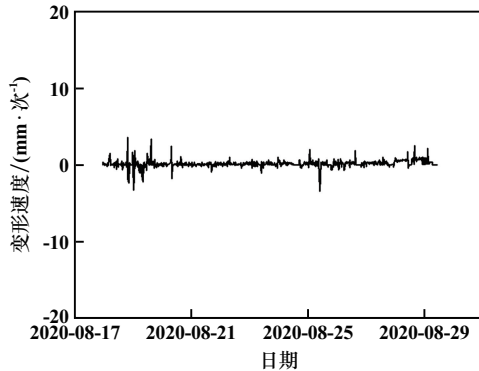


图 1 原始速度-时间序列曲线

从图 1 可以看出,原始数据的速度时间序列曲线有明显的波动性和振荡性,无法凸显形变规律,速度变形值在 $[-3 \text{ mm}, 3 \text{ mm}]$ 区间波动。

采用不同周期的错位相减法<sup>[6]</sup>,选取某一固定周期对累计位移曲线进行处理,求得更长周期内的形变速度,再转换为以小时(h)为单位,实现形变速度的单位统一。具体公式为:

$$\begin{cases} D_k = D_{i+m} - D_i & (i = 1, 2, \dots, n - m) \\ V_k = \frac{D_k}{m} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $D_i$  为某一时刻  $i$  的累计变形量;  $D_{i+m}$  为  $i+m$  时刻的形变位移量;  $V_k$  为在  $i \sim i+m$  时间间隔内,该点在  $k$  时刻的形变速度。此外,采用错位相减法时,前  $m$  个序列数据前没有可以用于错位相减的数据。

基于形变速度与边坡稳定性之间的负相关关系,应用速度倒数指标进行滑坡预警预报。对加速变形阶段的数据曲线进行拟合处理,根据曲线的特征收敛线与横坐标时间轴的交点预测潜在滑坡体可能出现滑坡的时间。具体公式为:

$$\frac{1}{V} = \frac{t_f - t}{d_f - d} \quad (2)$$

式中  $V$  为速度;  $t$  为时间;  $t_f$  为滑坡时间;  $d_f$  为滑坡位移形变量;  $d$  为位移形变量。临界滑坡状态,速度  $V$  趋近于无限大。

## 2 实验区域及数据

### 2.1 研究区域

地基 SAR 监测地点位于内蒙古包头市某铁矿,主要监测露天主采场西南帮,雷达监测近距 700 m、远距 1 500 m,视场水平角  $90^\circ$ ,垂直角  $30^\circ$ ,如图 2 所示。

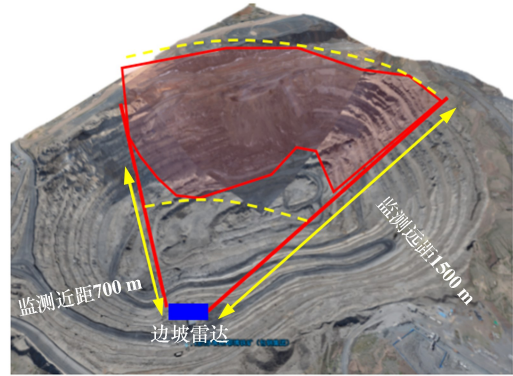


图 2 边坡雷达布设位置及其监测范围

### 2.2 数据源

选取 2020 年 7 月 26 日 0:17 至 2020 年 8 月 29 日 21:56 昼夜不间断雷达数据,数据采集时间为 20 min/组,距离向分辨率为 0.25 m,方位向分辨率为 8 mrad,中心频率为 17.2 GHz,共获取 35 天雷达影像数据。边坡雷达监测范围内累计变形如图 3 所示。

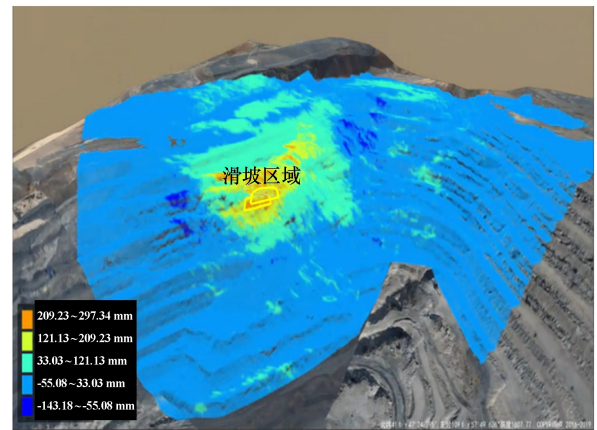
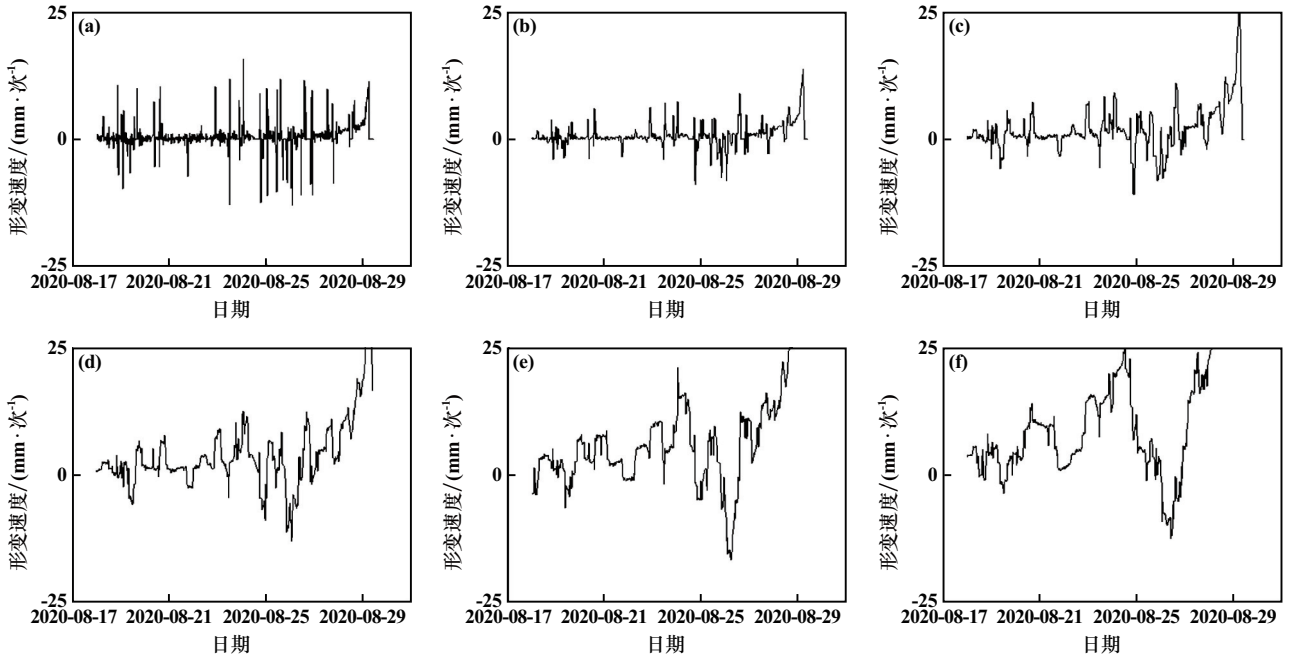


图 3 边坡雷达监测范围内累计变形云图

## 3 实验结果分析

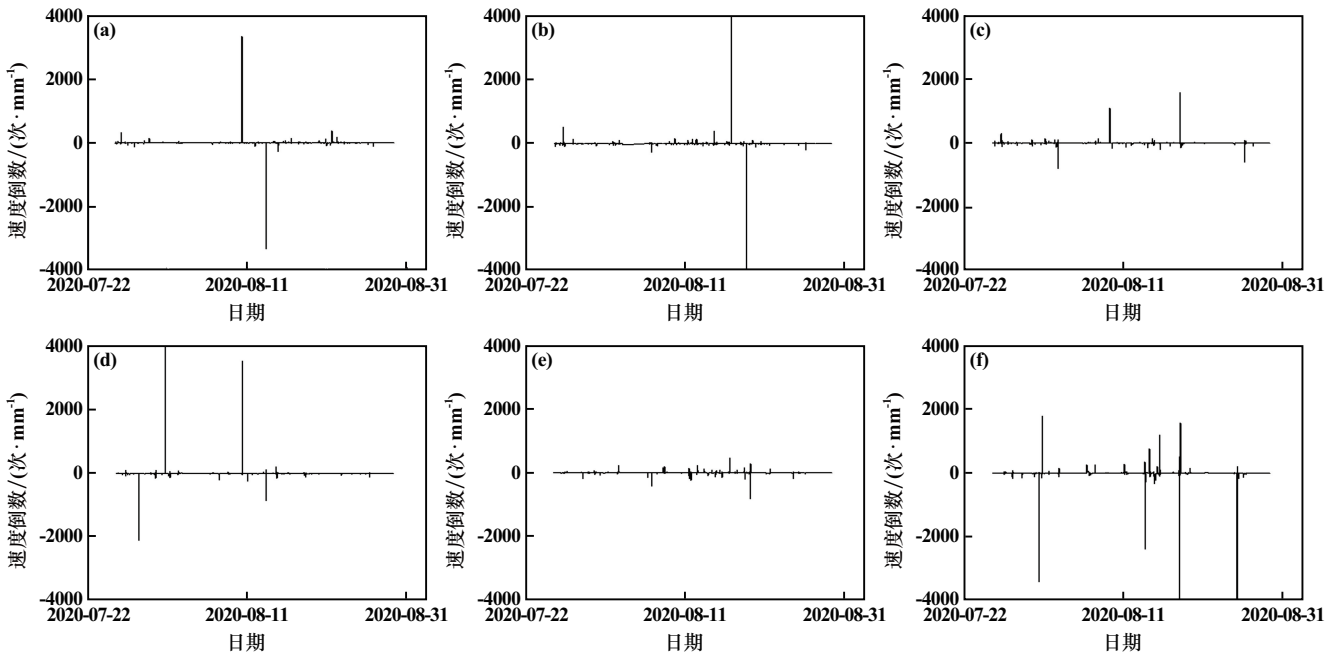
### 3.1 形变曲线特征分析

为了分析不同时间段速度时间序列曲线的形变规律,以监测边坡内蒙古某铁矿山变形区域内的不同周期监测数据为例,监测时间为 2020 年 8 月 18 日至 2020 年 8 月 29 日,监测频率为 20 min/次,所得错位相减的特征曲线如图 4~5 所示。



(a) 20 min 周期; (b) 1 h 周期; (c) 3 h 周期; (d) 6 h 周期; (e) 12 h 周期; (f) 24 h 周期

图 4 不同周期形变速度-时间序列曲线



(a) 20 min 周期; (b) 1 h 周期; (c) 3 h 周期; (d) 6 h 周期; (e) 12 h 周期; (f) 24 h 周期

图 5 不同周期速度倒数-时间序列曲线

从图 4 可以看出,原始形变数据经 20 min、1 h 周期错位相减后,与原始数据相比,波动性及振荡性开始减弱,曲线的特征形变规律开始显现;原始数据经 3 h 周期错位相减后,波动性和振荡性明显减弱,曲线的特征形变规律显著凸显;原始数据经 6 h、12 h、24 h 周期错位相减后,振荡性及波动性基本消失,曲线的特征

形变规律完全显现。随着处理周期增长,监测数据波动性及振荡性显著减小,曲线的基本特征和规律与原始数据基本一致,但形变的规律性、连续性和平滑性显著提升,处理周期越长,振荡性及波动性削弱效果越明显。

从图 5 可以看出,经 20 min、1 h 周期处理后的数

据取倒数后,个别点的数值明显增大,绝大多数点的数值较小;经3 h、6 h、12 h、24 h周期处理后的数据取倒数后,出现数值较大的点数增多,但绝大多数点依然保持较小数值。随着处理周期不断增长,出现较大数值点的个数越来越多,尽管大多数点的数值仍然在0上下波动,使得非关键变形阶段数据特征明显,但较大数值点的出现使得关键变形阶段数据特征被压制,即出

现了明显的“大数吃小数”现象。

### 3.2 滑坡曲线特征分析

为了解决“大数吃小数”问题,进一步凸显关键变形阶段数据曲线的特征规律,验证速度倒数法的适用性,选取内蒙古某铁矿山2020年8月18日0:41至2020年8月29日9:44边坡进入加速变形阶段的数据进行分析,结果见图6。

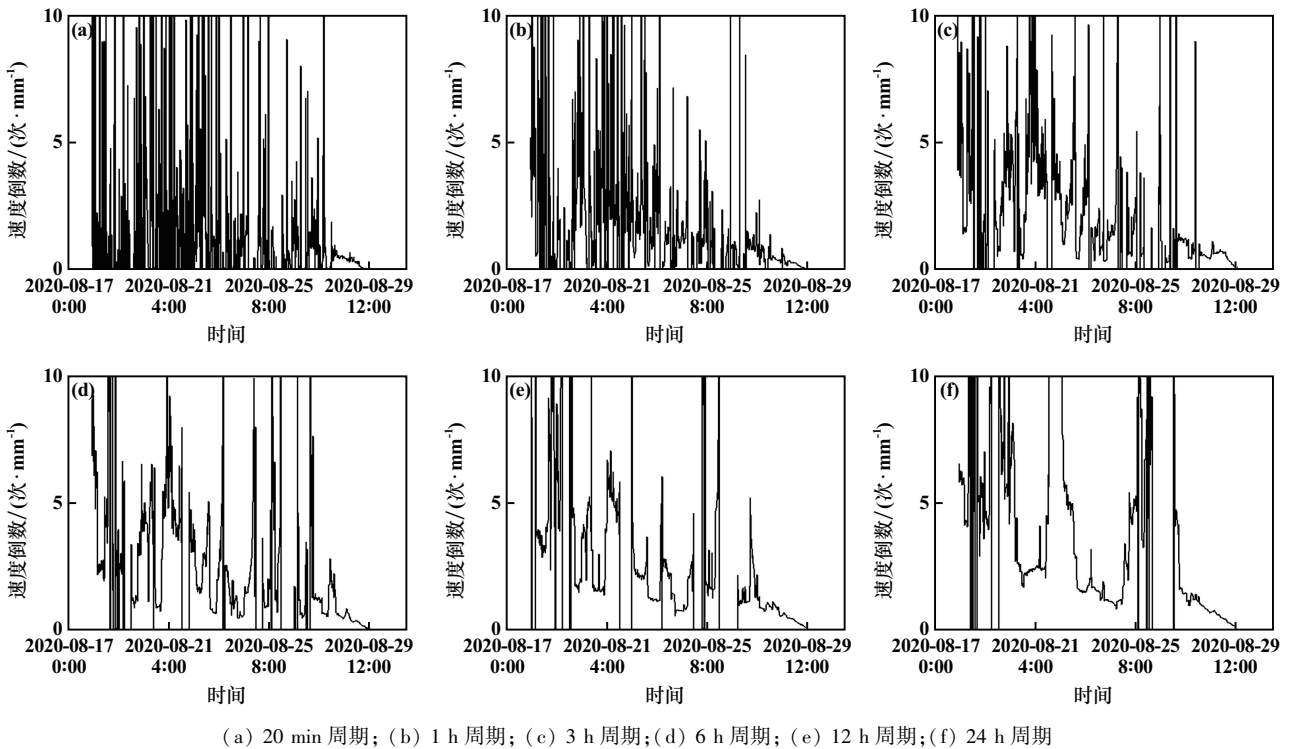


图6 去限值后不同周期处理滑坡预测线性拟合预测结果

从图6可以看出,20 min、1 h、3 h周期监测数据去限值后的数据曲线趋势性及收敛性开始显现,振动性明显减弱;6 h、12 h、24 h周期监测数据去限值后的数据曲线的趋势性及收敛性完全显现,振荡性显著减弱。对不同周期原始数据去限值、取倒数,解决了因监测数据振荡性高、特征趋势弱引起的曲线演化规律不明显问题,速度倒数-时间曲线的趋势性逐渐增强,也进一步验证了速度倒数预警法的适用性,然而预测滑坡时间的精度和准确性仍无法验证。

### 3.3 滑坡时间预测分析

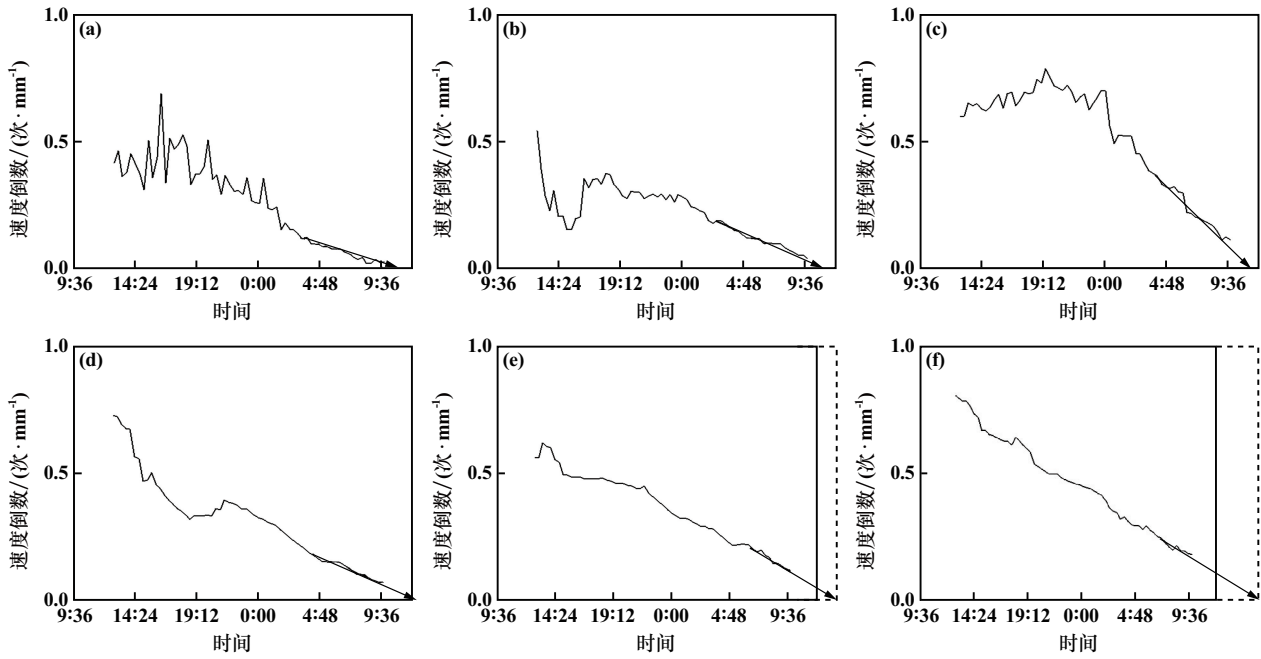
为了验证滑坡预报的精度和准确性,选取内蒙古某矿山2020年8月28日9:44至2020年8月29日9:44临滑坡前一段的数据进行分析,结果如图7所示。

从图7可以看出,对临滑坡前的数据进行拟合处理后,不同时间阶段的速度倒数曲线的趋势更加直观。采用20 min周期处理的数据,其收敛性开始显现,预

测滑坡时间与实际滑坡时间差约20 min,且预测滑坡发生的时间早于滑坡实际发生的时刻。采用1 h周期处理的数据,预测滑坡时间较实际滑坡时间差约10 min;采用3 h周期处理的数据,预测滑坡时间较实际滑坡时间差约1.1 h;采用6 h周期处理的数据,预测滑坡时间较实际滑坡时间差约2.7 h;采用12 h周期处理的数据,预测滑坡时间较实际滑坡时间差约6.2 h;采用24 h周期处理的数据,预测滑坡时间较实际滑坡时间差约10 h;1~24 h周期处理时预测滑坡发生时间均晚于实际发生时刻。

## 4 结 论

1) 对不等周期的滑坡预警预报结果进行对比分析,表明错位相减、形变速度取倒数的数据处理方法有效减弱了原始数据的振荡性及波动性,显著提升了特征形变的规律性。



(a) 20 min 周期; (b) 1 h 周期; (c) 3 h 周期; (d) 6 h 周期; (e) 12 h 周期; (f) 24 h 周期

图7 不同周期处理滑坡预测线性拟合预测结果

2) 对比分析滑坡预警预报的结果与实际滑坡时间,发现采用速度取倒数法预测的滑坡时间趋势与实际滑坡时间相近,预警准确性高、预报效果好、适用性强。

3) 不等周期的特征曲线预警预报效果不同。短周期处理的数据曲线预测的滑坡时间精度更高,但数据曲线进入收敛阶段的时间更晚,不利于组织早期人员的撤离。长周期处理的数据曲线预测的滑坡时间精度较低,且多为事后预测,但数据曲线进入收敛阶段的时间更早,有利于研判早期灾变体的滑坡风险。

#### 参考文献:

- [1] 易红卫,樊陵姣,谌涛. 基于有限元分析的矿山边坡自动数值建模与分析研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(3):30-33.
- [2] 刘璨,姜安民,董彦辰,等. 下伏复杂空区山体斜坡滑塌形成机理与数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(4):35-38.
- [3] 施建俊,孟海利,高克林. 境界顶柱稳定性的数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2004(6):7-10.
- [4] 宋来臣,林毅斌. 边坡雷达在露天矿山边坡滑坡预警的应用研究[J]. 煤炭技术, 2021,40(7):119-121.

- [5] 龚剑,欧阳治华. 基于Web网络技术的矿山安全预警系统及应用[J]. 金属矿山, 2010(7):150-152.
- [6] 秦宏楠,马海涛,于正兴. 地基SAR技术支持下的滑坡预警预报分析方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020,45(11):1697-1706.
- [7] 刘玉溪,秦宏楠,杨风芸,等. 地基SAR用于矿山应急救援地表沉降监测研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022,18(S1):25-30.
- [8] 许强,李为乐,董秀军,等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017,36(11):17-33.
- [9] 周志伟,程翔,周伟,等. 地基SAR在滑坡形变监测中的应用[J]. 测绘通报, 2022(7):60-63.
- [10] 赵东寅,申其鸿,马海涛,等. 国产地基合成孔径雷达监测预警系统在紫金山金铜矿露天采场边坡位移监测的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2015,11(4):54-58.
- [11] 秦宏楠,马海涛,于正兴,等. 地基雷达干涉测量动态高频数据用于滑坡早期预警方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 1-9. [2022-12-20]. DOI:10.13203/j.whugis20220152.
- [12] 刘玉溪,杨风芸,秦宏楠. 地基SAR数据优化及灾变体面积预警预报分析[J]. 测绘通报, 2022(12):51-56.

引用本文: 刘玉溪,杨风芸,秦宏楠. 基于地基合成孔径雷达数据的预警预报方法研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):33-37.