



# 高寒高海拔矿山监测技术与装备

---

**于正兴 博士**

**中国安全生产科学研究院 正高级工程师**

**中安国泰(北京)科技发展有限公司 董事长兼总经理**

**2025年12月**

一

**高寒高海拔露天矿边坡监测难题**

二

**边坡监测系统建设要求及先进技术**

三

**高寒高海拔边坡监测核心技术与装备**

四

**边坡监测预警经验与展望**

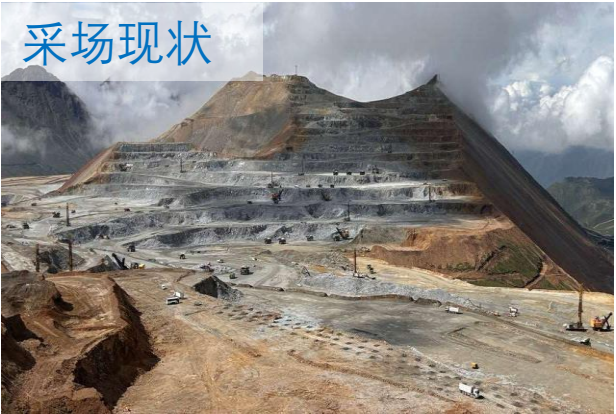
# 一、高寒高海拔露天矿边坡监测难题

- 高寒高海拔地区露天矿山**数量多**，国家正大力推进相关地区的矿产资源开发。
- 高寒高海拔地区露天矿**规模大、边坡高且陡**。巨龙铜矿露天采场最大终了边坡高度 **1063m**。翔龙矿业朱诺铜矿采场最大边坡高度 **1024m**。

表 1 我国高寒、高海拔地区部分典型多金属矿床

行政区域	矿山名称	主要资源	海拔	储量	开采方式
西藏	甲玛铜矿	铜	4400~4970	717 万吨	露天+井工
	玉龙铜矿	铜	4569~5118	1072 万吨	露天
	巨龙铜矿	铜		795 万吨	露天
	驱龙铜矿	铜	5000~5519		露天
	朱诺铜矿	铜	4460~5850	220 万吨	露天
云南	普朗铜矿	铜	3400~4500	480 万吨	井工
青海	大柴旦滩间山金矿	金	3200	98 吨	井工
	格尔木市牛苦头铅锌矿	铅锌	3780	109.98 吨	露天+井工
	夏日哈木镍矿	镍	3400	118.3 万吨	露天
甘肃	早子沟金矿	金	2950~3300	82 吨	井工
	镜铁山铁矿	铁	2800~4200	5.53 亿吨	露天
	南木塔矿区金矿	金	3200~3890		井工
	下看木仓金矿	金	3090~3444		井工
	格尔托金矿	金	3600~3900		井工
新疆	石沟铅锌矿	铅锌	3170~3777		井工
	萨瓦亚尔顿金矿	金	3400~3925	9.6 吨	露天
	孜诺依北铁矿	铁	4283~4545	435.47 万 t	露天
	切列克其铁矿	铁	3860~4750	7804.3 万吨	露天
	大红柳滩	锂	5200	356 万吨	露天
	火烧云	铅锌	5700	2100 万吨	露天
	备战铁矿	铁	3390~3600	4535 万吨	井工
	敦德铁矿	铁	3480~4500	2596.7 万吨	井工

全国典型高海拔矿山统计表

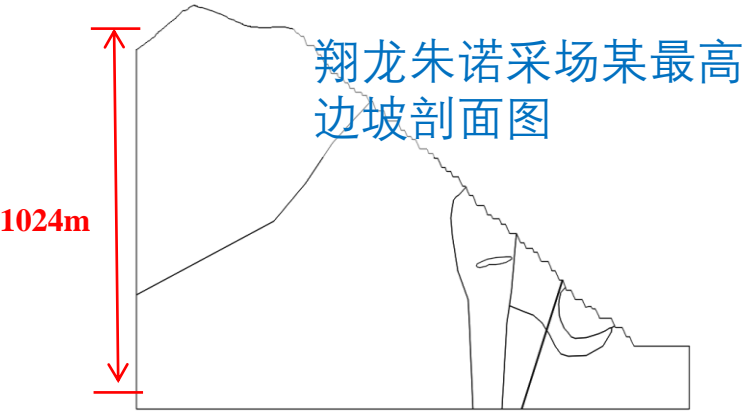


采场现状



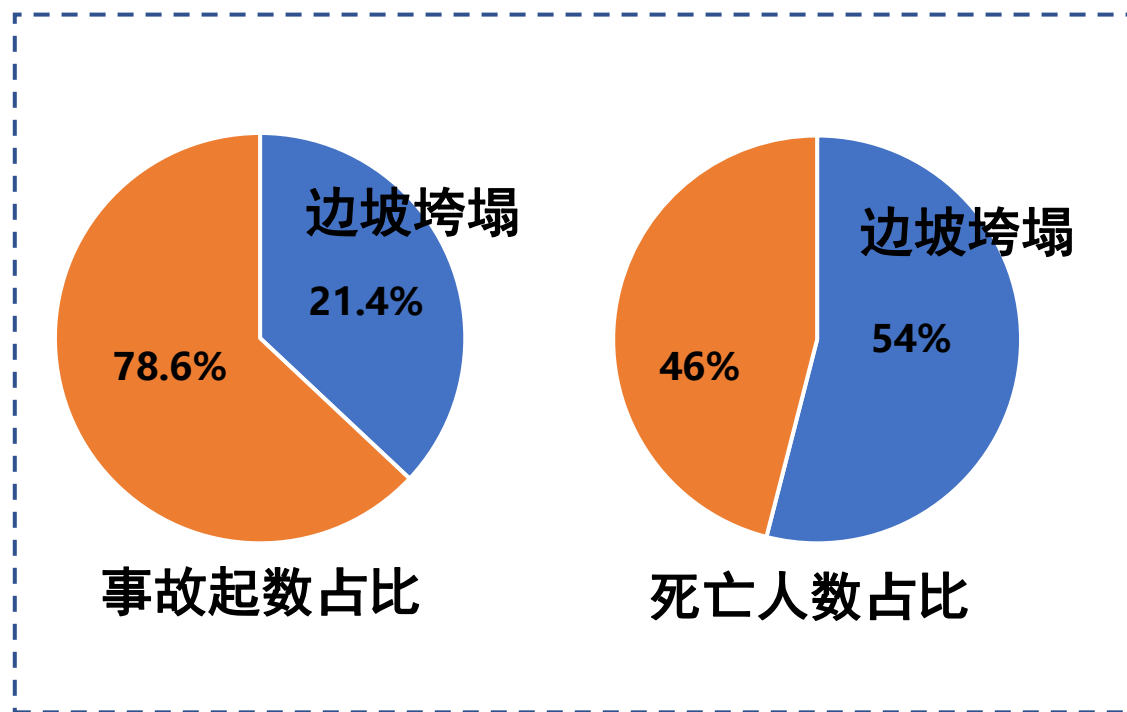
采场寒冬

巨龙矿山



# 一、高寒高海拔露天矿边坡监测难题

- 近十年来，露天矿边坡垮塌事故起数与死亡人数均居**首位**。
- 近20年发生十余起露天矿山重特大事故：分别为火药爆炸事故和边坡坍塌事故，边坡坍塌在露天矿山重特大事故中占比**78.6%**。



因此，边坡安全是遏制露天矿较大及以上事故的“牛鼻子”！

# 一、高寒高海拔露天矿边坡监测难题

- 高寒高海拔环境：低温导致**设备运行不稳定**；低气压**数据失真**；预警**准确性**受影响。



电子元件失效



微波大气折射



预警准确性

**因此，高寒高海拔地区露天矿边坡安全监测面临严峻挑战！**

一

高寒高海拔露天矿边坡监测难题

二

边坡监测系统建设要求及先进技术

三

高寒高海拔边坡监测核心技术与装备

四

边坡监测预警经验与展望



## 二、边坡监测系统建设要求及先进技术

### 内蒙古阿拉善新井煤业有限公司露天煤矿“2·22”特别重大坍塌事故

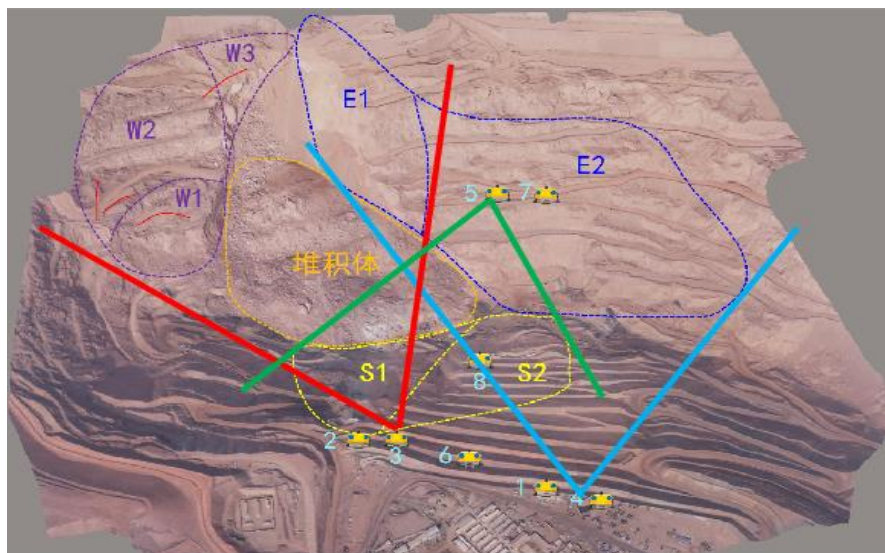




## 二、边坡监测系统建设要求及先进技术

习近平总书记批示“**科学组织施救，加强监测预警，防止发生次生灾害**”

各类设备在边坡监测中应用成效显著，通过及时预警与预报，有效防范了次生灾害的发生



4大监测区域

6类监测手段

39台设备

边坡雷达：8台

裂缝计：9台

单点定位：10台

微芯桩：12台

地震监测站：4处

人工监测点：8处





## 二、边坡监测系统建设要求及先进技术

### 《国家矿山安全监察局关于开展露天矿山边坡监测系统及联网工作的通知》

#### 建设范围：

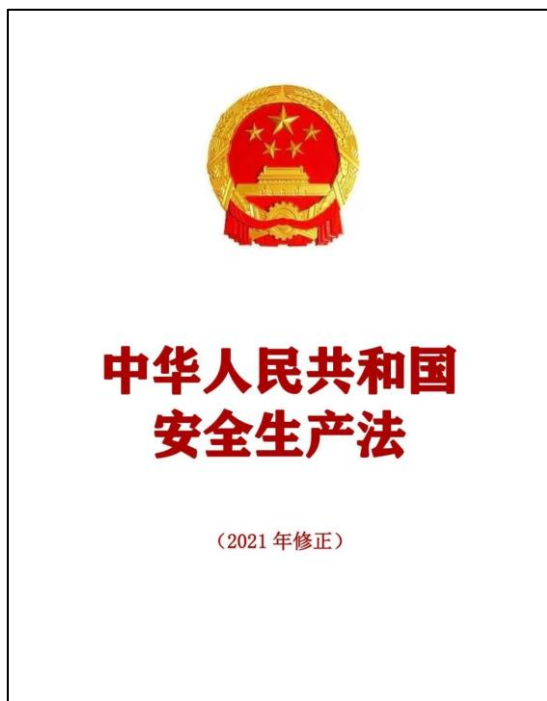
1.所有正常生产建设的露天煤矿采场和排土场边坡；2.所有正常生产建设的现状高度150米及以上的金属非金属露天矿山采场边坡；3.所有现状堆置高度150米及以上的金属非金属露天矿山在用排土场的边坡。

#### 建设内容：

表面变形、视频图像、内部变形、应力、地下水、爆破振动、降雨量等。其中，表面变形和视频图像为必须监测项目，其他监测项目根据现行标准规范和各级矿山安全监管监察部门要求，结合矿山实际开展建设。

## 二、边坡监测系统建设要求及先进技术

**设计要求：**未开展边坡监测系统建设的露天矿山企业，要**委托原（安全设施）设计单位**，或**具备相应设计资质**的单位进行**边坡监测系统**设计，并组织专家评审通过后按设计实施及验收；已开展边坡监测系统建设但不符合本文件要求的，要**补充设计或重新设计**。



目前全国大多数露天矿山已设计建设了边坡监测系统并联网。

## 二、边坡监测系统建设要求及规范

### 预警及响应：

**预警值及设置：**露天矿山企业是边坡监测预警值设置的责任主体，企业不具备能力的，要委托专业机构进行预警服务。

**预警等级设定：**预警等级应分为四级（原因：公共安全突发），分别用**红、橙、黄、蓝**标示。短时间内滑坡可能性非常大，极易造成人员伤亡的应定为一级红色预警；短时间内滑坡可能性大，容易造成人员伤亡的应定为二级橙色预警；滑坡可能性较大，可能造成人员伤亡的应定为三级黄色预警；有滑坡可能性且影响正常生产的应定为四级蓝色预警。

**预警响应处置：**露天矿山企业是预警响应的责任主体，应建立边坡监测预警分级响应处置机制，并纳入应急预案，**第一时间进行核实、处理、整改**。预警及响应处置情况要形成信息台账，**实现预警信息有效、及时处置和闭环管理**。



## 二、边坡监测系统建设要求及先进技术

### 主要技术规范：

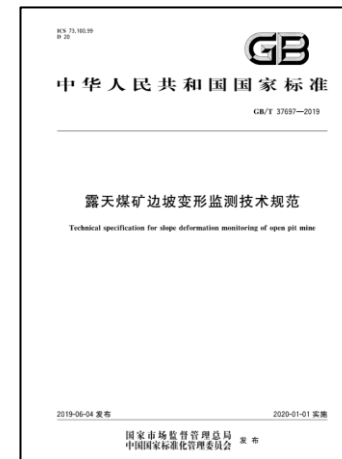
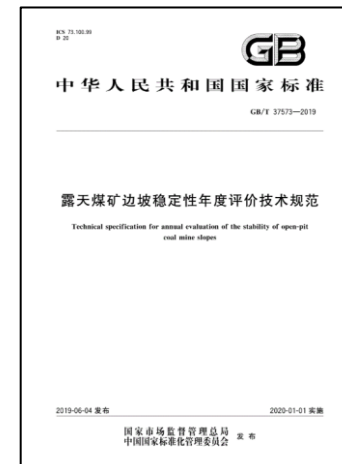
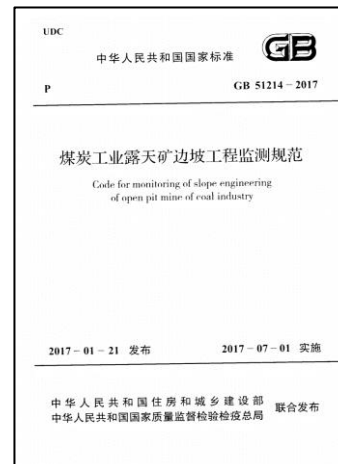
GB 51214-2017 煤炭工业露天矿边坡工程监测规范

GB / T 37697-2019 露天煤矿边坡变形监测技术规范

GB 51016-2014 非煤露天矿边坡工程技术规范

MT / T 1183-2020 露天矿边坡稳定性分析及岩移监测方法

KA / T 2063-2018 金属非金属露天矿山高陡边坡安全监测技术规范



## 二、边坡监测系统建设要求及先进技术

### 监测系统建设基本原则：

### 分区评估、分级监测、分期实施

高度等级指数H	分类名称	高度
1	超高边坡	大于500m
2	高边坡	200m~500m
3	中高边坡	100m~200m
4	低边坡	小于100m

坡度等级指数A	分类名称	总边坡角度
1	陡坡	大于42°
2	斜坡	30°~42°
3	缓坡	小于30°

地质条件指数G	水文地质条件	工程地质条件
1	复杂	复杂
2	中等	中等
3	简单	简单

**$D=H+A+G$**   
D为变形指数 H为高度等级指数 A为坡度等级指数 G为地质条件指数

滑坡风险等级指数S	安全系数F	
	正常工况	非正常工况
1	$F < 1.1$	$F < 1.05$
2	$1.1 \leq F < 1.2$	$1.05 \leq F < 1.15$
3	$1.2 \leq F < 1.3$	$1.15 \leq F < 1.25$
4	$1.3 \leq F$	$1.25 \leq F$

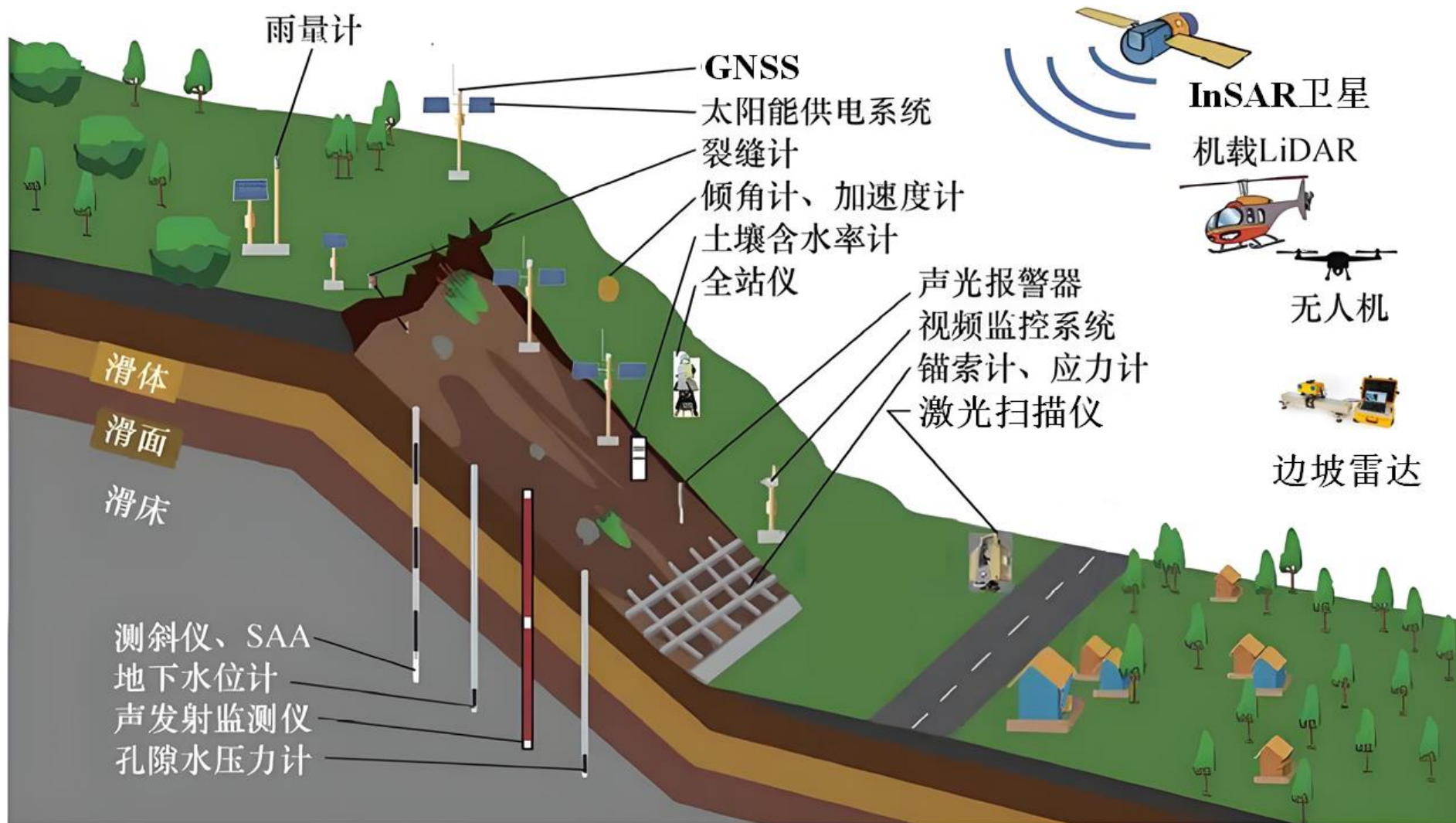
安全监测等级	变形指数D	滑坡风险等级S
一级	3或4	1
二级	5或6	2
三级	7或8	3
四级	9或10	4

监测等级	变形监测			采动应力监测 <sup>b</sup>	爆破震动	水文气象监测			视频监控
	表面位移	内部位移	边坡裂缝 <sup>a</sup>		质点速度	渗透压力 <sup>c</sup>	地下水位 <sup>c</sup>	降雨量	
一级	●	●	○	●	●	●	●	●	●
二级	●	○	○	○	●	○	●	●	●
三级	●	○	○	○	○	○	○	●	●
四级	○	×	○	×	○	×	×	○	○

《金属非金属露天矿山高陡边坡安全监测技术规范》KA/T 2063-2018

## 二、边坡监测系统建设要求及先进技术

### 多种监测手段：





## 二、边坡监测系统建设要求及先进技术

露天矿山在用的边坡在线监测技术：

边坡表面位移为必须监测项，GNSS 或 边坡雷达 为建议监测手段。

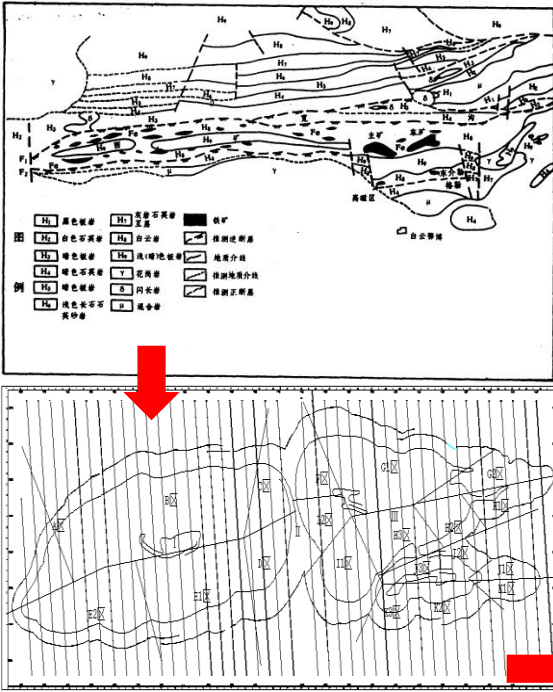
监测指标	监测设备	技术类型	基本原理	适用条件	安装条件	优点	缺点	应用情况
表面位移	GNSS	接触式点监测	全球定位导航	关键部位	施工测桩	数据可靠性高	测桩受限	大量
	边坡雷达	遥感式面监测	微波干涉	通视长大边坡	施工监测房	大范围高精度	设备贵	部分
	测量机器人	接触式点监测	红外测距	通视长大边坡	施工测桩和监测房	数据可靠性高	测桩受限	较少
	激光扫描仪	遥感式面监测	激光测距	通视近距边坡	施工监测房	三维实时建模	环境误差大	较少
	InSAR卫星	遥感式面监测	微波干涉	仅作为辅助监测	无需安装	不依赖设备	不能实时	较少
内部位移	钻孔倾斜仪	埋置式点检测	滑动面测斜	关键部位靠帮边坡	施工钻孔	灵敏度高	施工量大	部分
裂缝变形	裂缝计	接触式点监测	裂缝位移	有贯通性裂缝	简易	廉价	临滑安装	较多
应力监测	锚杆应力计	埋置式点监测	支护变形受力	关键部位靠帮边坡	施工钻孔	数据灵敏	施工量大	部分
爆破震动	爆破震动仪	接触式点监测	震动加速度	与爆破作业同步	简易	控制爆破影响	不能实时	部分
水文监测	水位计	埋置式点监测	地下水位变化	靠帮边坡	施工钻孔	数据可靠性高	施工量大	较多
	渗压计	埋置式点监测	地下渗流力	水文复杂靠帮边坡	施工钻孔	灵敏度高	布点难	较少
	雨量计	接触式点监测	降雨强度	仅辅助监测	简易	廉价	预警难	较多
视频监控	摄像云台	遥感式面监测	光学成像	通视	简易	廉价	预警难	大量

# 二、边坡监测系统建设要求及先进技术

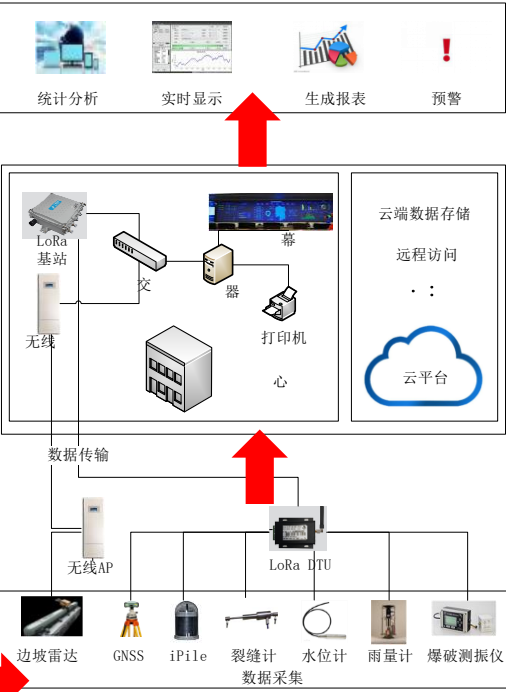
## 建设流程：



## 设计



边坡分区		亚区	总高度 (m)	边坡倾角 (°)	工程地质条件	水文地质条件	正常工况的安全系数	非正常工况的安全系数	安全监测等级
西采场	A		112	24	中等	中等	2.093	1.756	三
	B		128	19	中等	复杂	1.977	1.532	三
	C		176	31	中等	中等	2.140	1.803	三
	D		179	28	中等	简单	1.200	1.055	二
	E	E1	172	25	中等	简单	2.171	1.837	三
E2		114	32	中等	简单	2.606	2.205	三	
北采场	F		128	26	中等	中等	1.772	1.306	三
	G	G1	166	25	中等	复杂	1.497	1.103	三
		G2	153	25	中等	复杂	2.088	1.605	三
	H	H1	97	33	中等	简单	1.307	1.058	二
		H2	94	21	中等	简单	1.714	1.308	四
		H3	151	31	中等	简单	稳定	稳定	三
	I	I1	86	20	中等	简单	1.812	1.234	四
		I2	74	21	中等	简单	2.038	1.595	四
南采场	J	J1	80	47	中等	简单	2.418	2.037	三
		J2	106	26	中等	简单	1.992	1.449	三
		J3	78	17	中等	简单	稳定	稳定	四
	K	K1	96	36	中等	简单	2.294	1.871	三
		K2	111	41	中等	简单	2.034	1.590	三
		K3	85	29	中等	简单	稳定	稳定	四



边坡监测系统应当根据露天矿山边坡勘察报告、边坡稳定性研究报告和开采设计等资料，结合采场边坡工程地质复杂程度、水文地质条件、生产和揭露的地质情况及排土场基底地质条件、排弃方式、剥离物构成等情况，分区评估边坡稳定性现状，明确各分区内边坡安全监测等级，按照最终边坡境界、不同时期和不同开采要求进行边坡监测方案总体设计，并按设计要求分阶段进行建设。

# 二、边坡监测系统建设要求及先进技术

边坡雷达是采用微波遥感干涉技术高精度测量边坡表面变形的装备。





## 二、边坡监测系统建设要求及先进技术

目前矿山应用最为广泛的是 **合成孔径边坡雷达**

具有以下优点：

**全天候（不受雨雾干扰）**

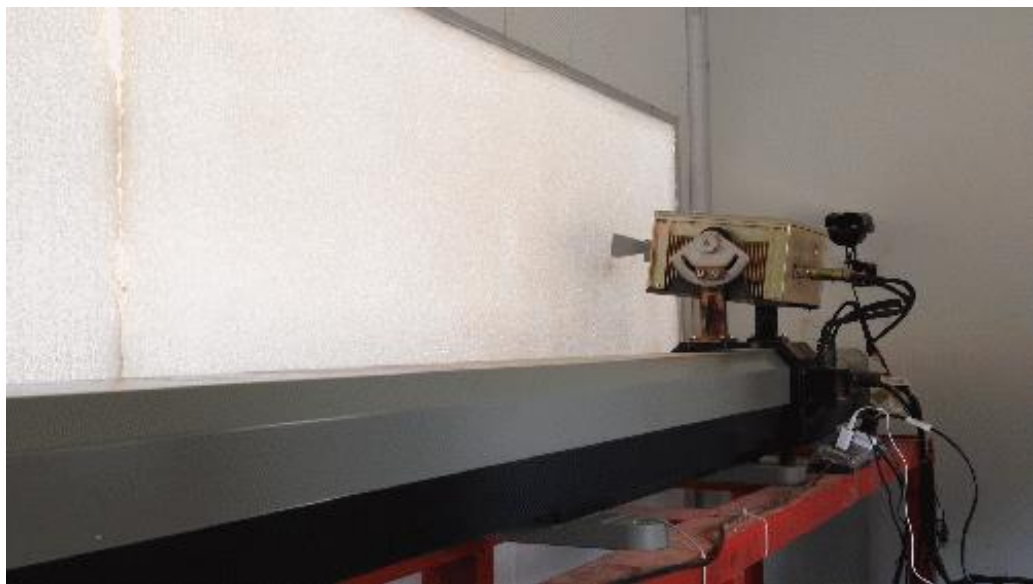
**高精度（亚毫米级）**

**大范围（ $\geq 5\text{km}$ ,  $120^\circ$ ）**

**无接触（遥感监测）**

**高分辨率**

**快速连续（ $\leq 10\text{min}$ ）**



移动过程中的雷达射频前端



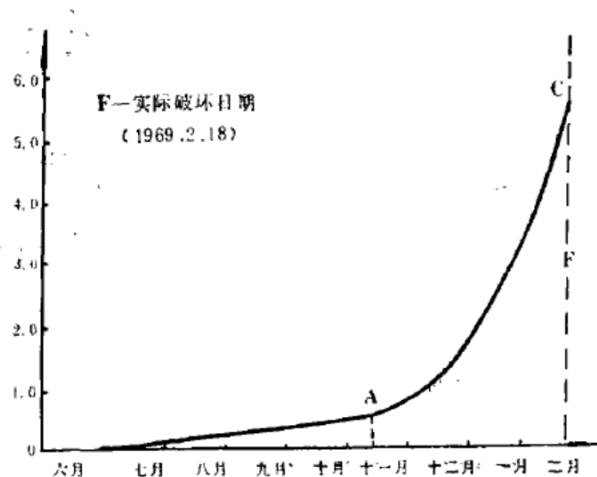
利用运动合成一个“大口径”天线，增强分辨率

## 二、边坡监测系统建设要求及先进技术

### 如何利用监测数据进行预警预报？

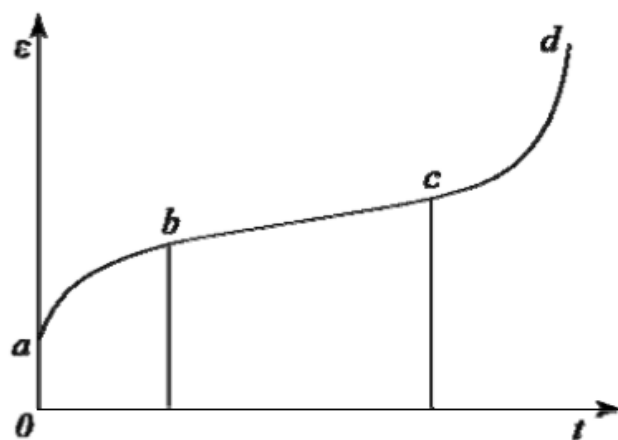
#### 黄金分割法

**核心思路：**线性变形阶段与非线性变形阶段的比值接近黄金分割点 (0.618)



#### 斋藤法

**核心思路：**边坡破坏经历3个蠕变阶段，第3阶段加速可用来预测滑坡时间



#### 切线角法

**核心思路：**

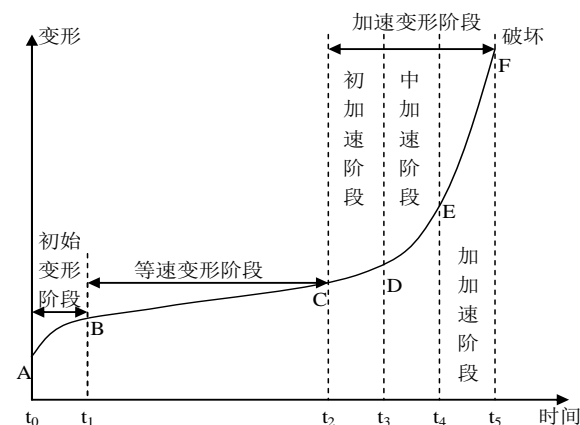
1、滑坡破坏前速度增加，S-T曲线上升，以角度大小反应速度变化趋势；

2、横纵坐标对角度影响的处理

#### 速度倒数法

**核心思路：**

通过静载作用下岩石蠕变曲线，探明变形速度与破坏时间的关系



## 二、边坡监测系统建设要求及先进技术

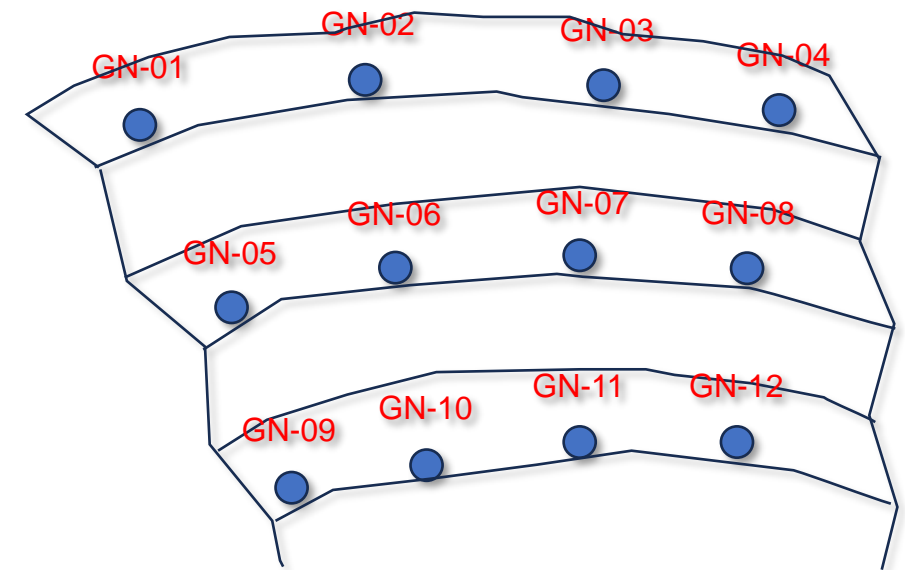
- 滑坡变形曲线千变万化，预警参数需量身定制！避免过于迷信监测设备，不要追求绝对预警阈值！

国家矿山安全监察局关于印发《矿山安全风险监测预警处置工作管理办法（试行）》的通知

### 露天矿山边坡预警信息设计标准

边坡表面变形量			
24 小时变形量达到上个月所有监测点变形量的平均值 20%以上	24 小时变形量达到上个月所有监测点变形量的平均值 60%以上	24 小时变形量达到上个月所有监测点变形量的平均值 80%以上	24 小时变形量达到上个月所有监测点变形量的平均值 100%以上
蓝	黄	橙	红

注：对露天矿山采场、排土场的边界范围、台阶高度、平台宽度、边坡角度等指标，各地可根据露天矿山安全设施设计报告中的设计值，结合无人机航测、卫星遥感等监测数据进行分析预警。



$$\Delta_{cr, \text{蓝}} = \frac{1}{12} (\Delta_{01} + \Delta_{02} + \cdots + \Delta_{12}) \times 20\%$$

↓  
蓝色预警阈值

各监测点上月位移量



一

高寒高海拔露天矿边坡监测难题

二

边坡监测系统建设要求及先进技术

三

高寒高海拔边坡监测核心技术与装备

四

边坡监测预警经验与展望

### 三、高寒高海拔边坡监测核心技术与装备

#### 三大问题

- ❖ 高寒地区雷达硬件稳定性不足
- ❖ 高海拔地区低气压信号衰减与失真问题
- ❖ 边坡预警准确性受影响



#### 三项成果

- ❖ 研发温度自适应雷达方舱
- ❖ 提出雷达数据大气校正算法
- ❖ 建立了多种滑坡预警预报模型

### 三、高寒高海拔边坡监测核心技术与装备

#### □ 研发温度自适应雷达方舱

针对高寒高海拔地区雷达设备在低温条件下稳定性不足的问题，研发了温度自适应方舱系统。该系统可根据外界温度自动调节舱内环境，解决低温引起的电子元件失效和信号不稳定问题，确保雷达设备在极端寒冷条件下仍能保持稳定运行，从根本上提升设备长期监测的可靠性与连续性。



抗寒拖车雷达方舱



抗寒拖车雷达现场应用

# 三、高寒高海拔边坡监测核心技术与装备

## 提出雷达数据大气校正算法

针对稀薄大气导致的雷达信号衰减与失真问题，提出雷达数据大气校正算法，并采用反射器标定实现实时校正。通过融合气压、温湿度、风场等气象要素，实现对雷达信号传播路径和衰减特性的实时修正，形变精度提升至 0.1 mm。

输入为温度 T、气压 P、湿度 e 气象参数非线性修正：  
$$n_1(T, P, e) = n_{ITU}(T, P, e) + \Delta n_{RF}(T, P, e, \dots)$$

相位延迟：  
$$\phi_{大气} = \frac{4\pi}{\lambda} \int_{路径} (n_1(s) - 1) ds$$

随机森林回归模型：  
$$\Delta\phi_r = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B T_b(X), \quad X = [T, P, e, \nabla T, \nabla P, \dots]$$

相位修正：  
$$\min \sum_{i=1}^N \left( \Delta\phi_r^{(i)} - (\phi_{反射器}^{(i)} - \phi_{观测}^{(i)}) \right)^2$$
  
$$\phi_{形变} = \phi_{观测} - \phi_{地形} - (\phi_{大气} + \Delta\phi_r)$$
  
$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \phi_{形变}$$

形变监测误差标准差修正：  
$$\sigma_d \leq \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\sigma_F^2 + \sigma_{噪声}^2}$$

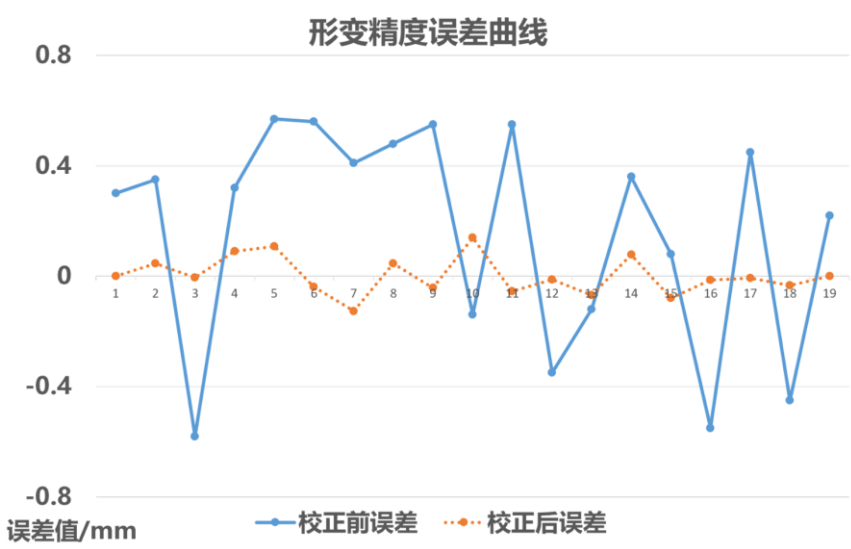
双联驱动折射率模型



算法软件成果



雷达反射器标定方法



校正后形变精度误差 0.5mm→0.1mm



### 三、高寒高海拔边坡监测核心技术与装备

#### □ 建立三参数预警模型

针对传统预警体系在复杂环境下有效性不足的挑战，**构建了基于三参数的边坡预警模型（速度阈值、面积阈值、持续时间）**。该模型通过综合分析三类关键监测指标，对异常形变过程进行更可靠的判识与筛选，显著降低误报与漏报率，提升预警系统的稳定性与工程应用价值。

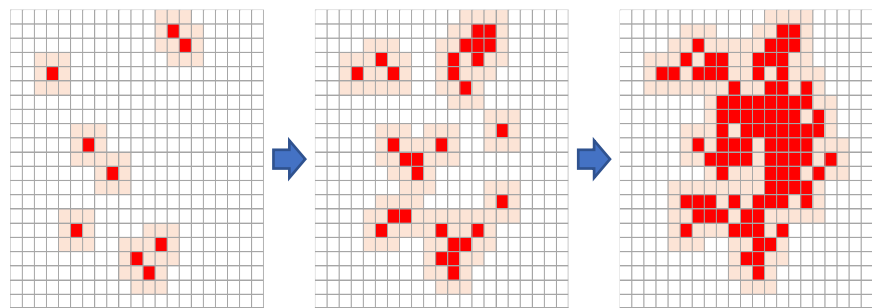
##### ● 三参数

速度阈值-面积阈值-持续时间

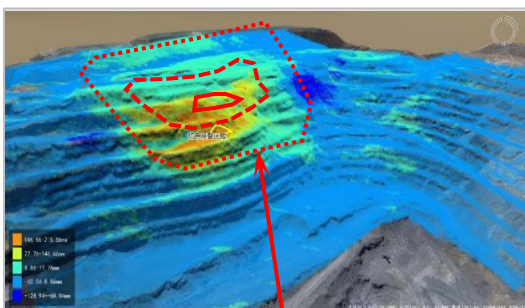


红、橙、黄、蓝 四级预警对应不同预警阈值

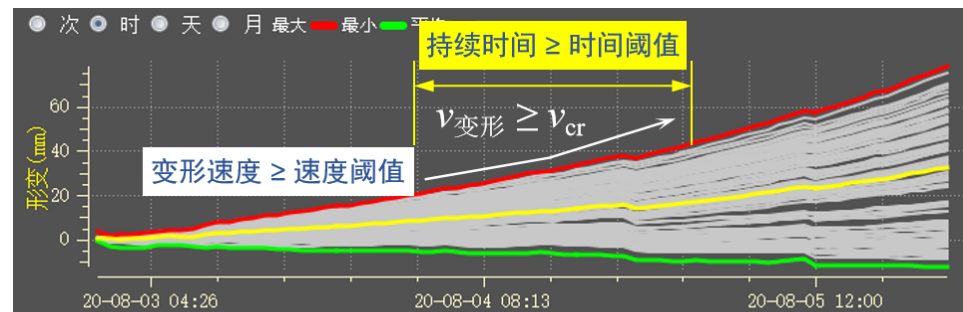
将超过**速度阈值**的区域视为活跃区域，活跃区域范围超过**面积阈值**时视为存在滑坡风险，**持续一定时间**后触发预警。



自动搜索像素点，计算高变形区面积



面积不断增大



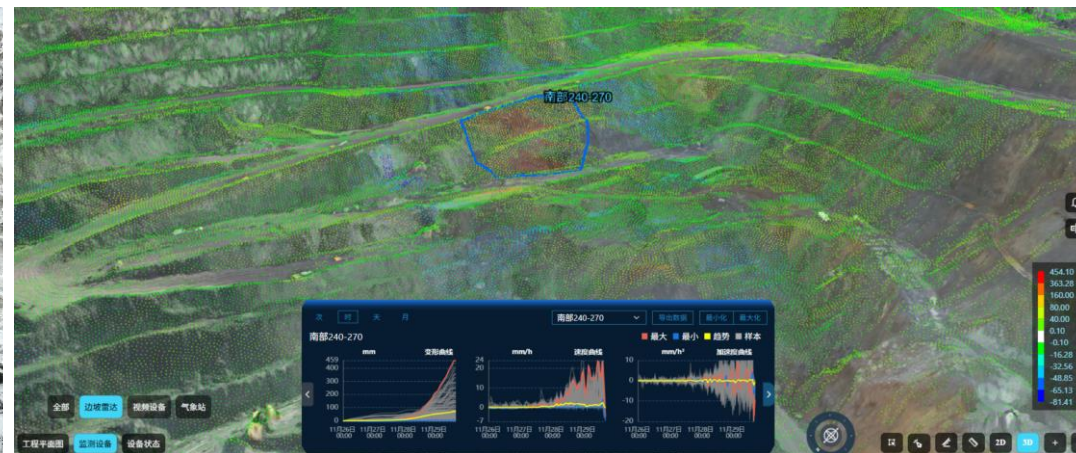
变形速度持续增大，持续较长时间

### 三、高寒高海拔边坡监测核心技术与装备

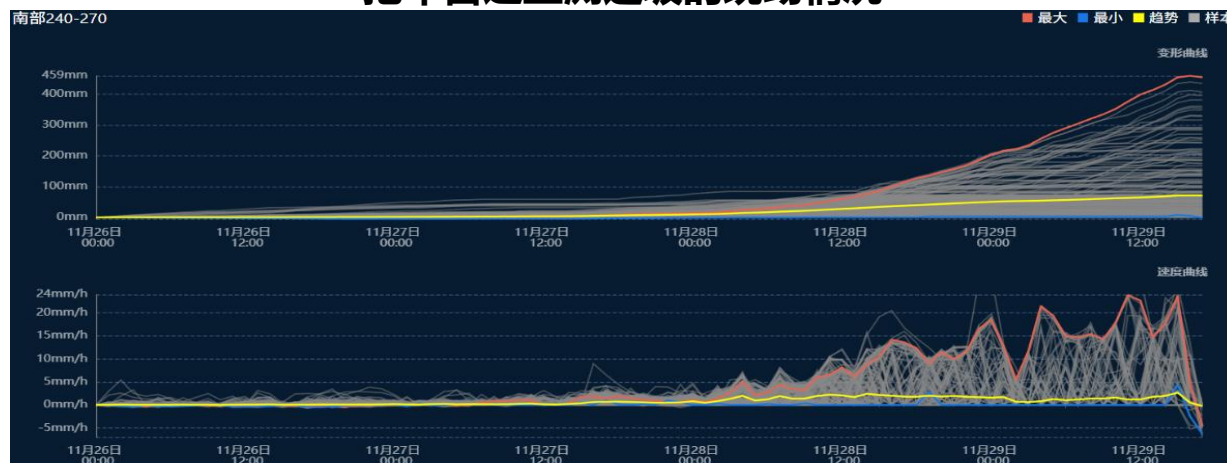
成功预警案例：2024年11月28日，某露天矿山（海拔4100m）边坡开始产生明显的高变形形，依次触发了**蓝、黄、橙、红四级预警**，随后预警区域发生滑坡。



拖车雷达监测边坡的现场情况



雷达监视云图情况



滑坡区域位移变形曲线

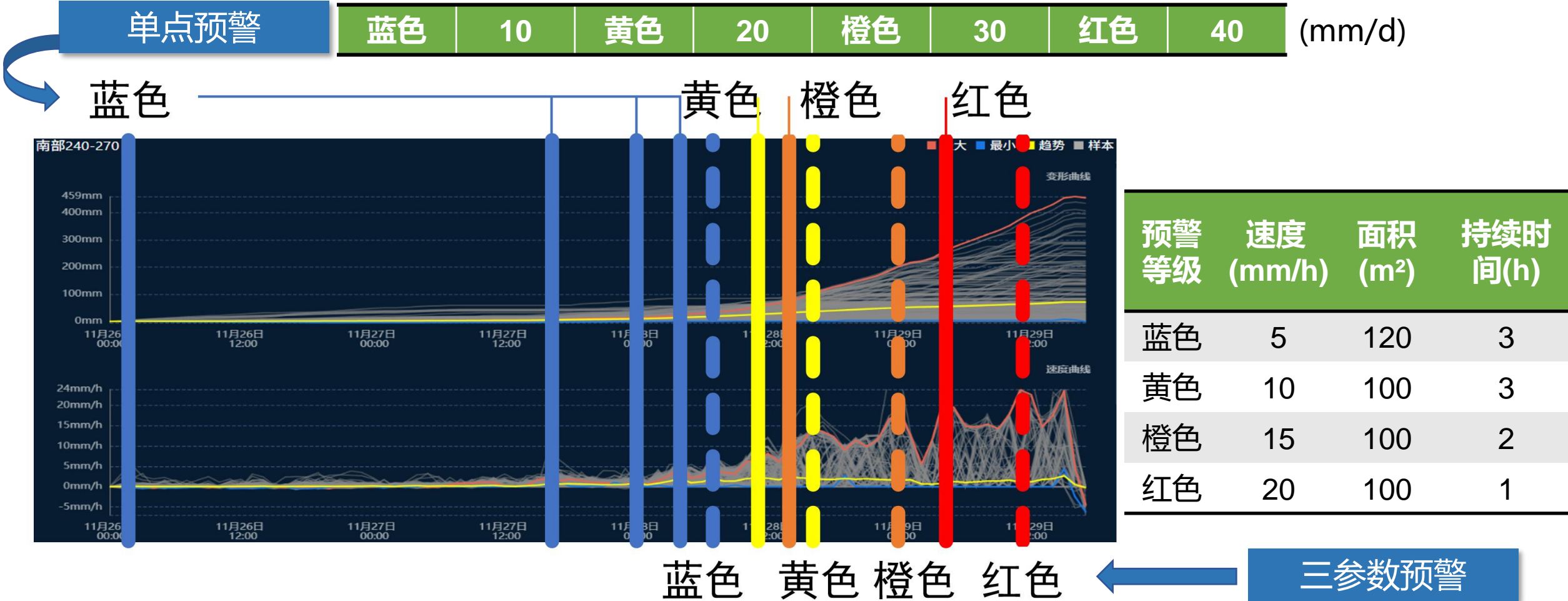


现场滑坡情况



### 三、高寒高海拔边坡监测核心技术与装备

该案例中，采用不同的预警方法得到的结果差异性较大。

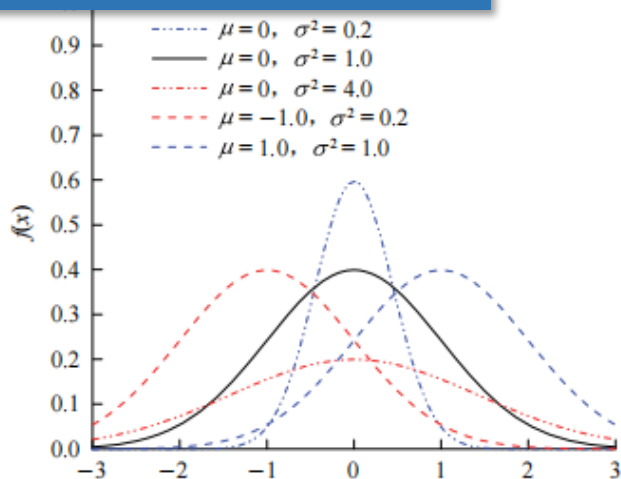


采用单点预警方法容易导致预警频发；三参数预警逐级升高，区域集中，命中率高

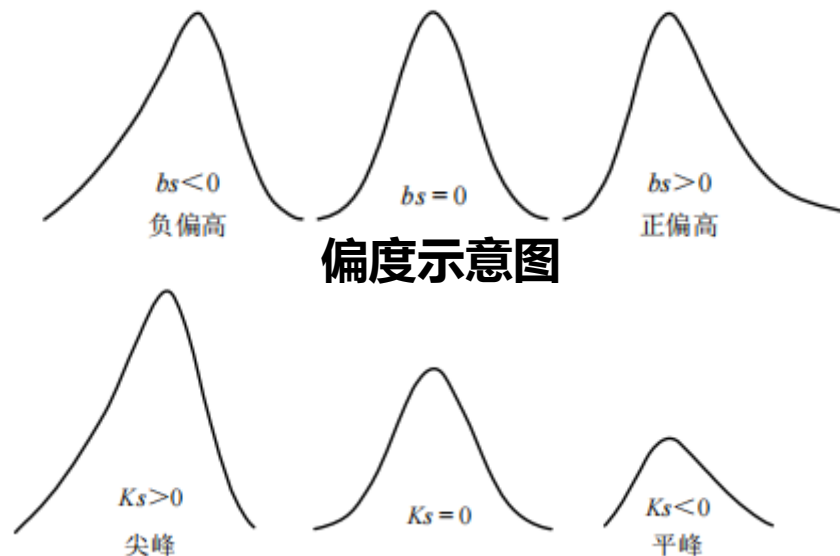
### 三、高寒高海拔边坡监测核心技术与装备

在预警的基础上，进一步进行基于速度倒数法的滑坡时间预报研究

#### 单点监测数据预报

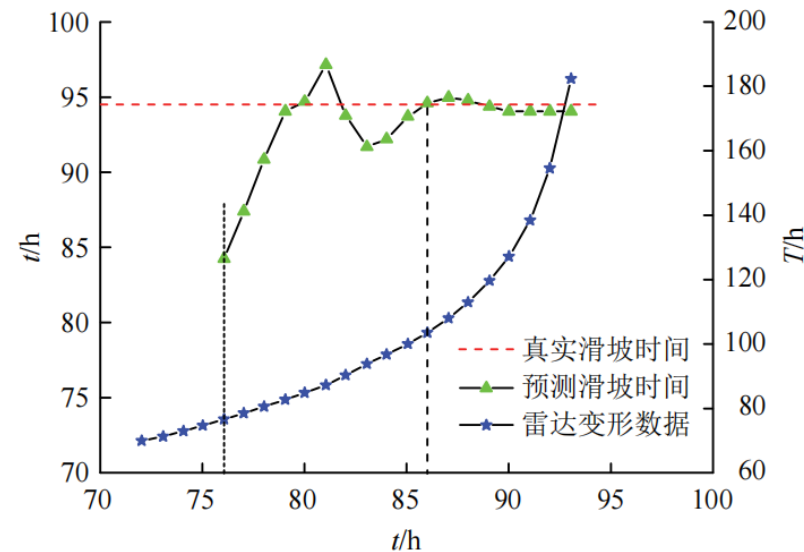


随机变量正态分布密度函数曲线



偏度示意图

峰度示意图



与真实滑坡时间对比

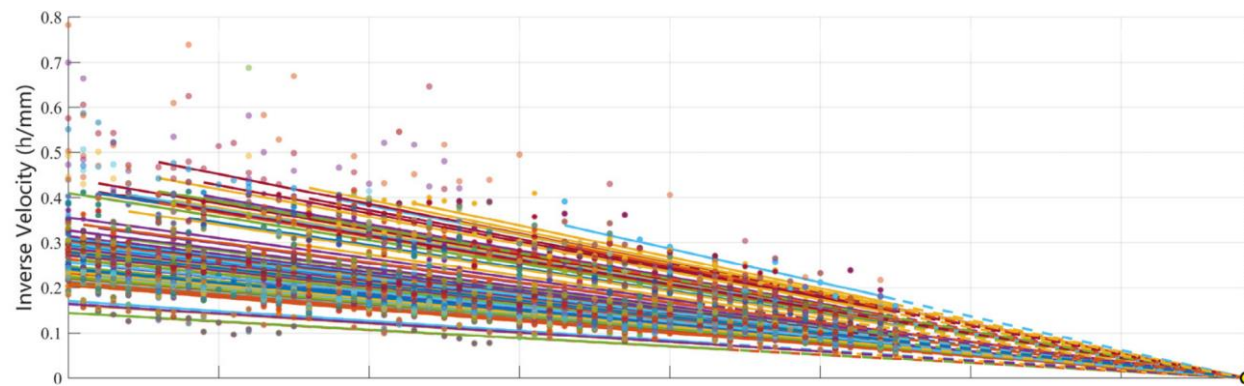
#### 多点位联合预报

速度倒数  
基本原理

$$\frac{1}{V} = [A(\alpha - 1)]^{\frac{1}{\alpha-1}} (t_f - t)^{\frac{1}{\alpha-1}}$$

非线性最  
小二乘

$$\min_t \|f(t)\|_2^2 = \min_t (f_1(t)^2 + f_2(t)^2 + \dots + f_n(t)^2)$$



实现小时级滑坡时间预报误差!



一

**高寒高海拔露天矿边坡监测难题**

二

**边坡监测系统建设要求及先进技术**

三

**高寒高海拔边坡监测核心技术与装备**

四

**边坡监测预警经验与展望**

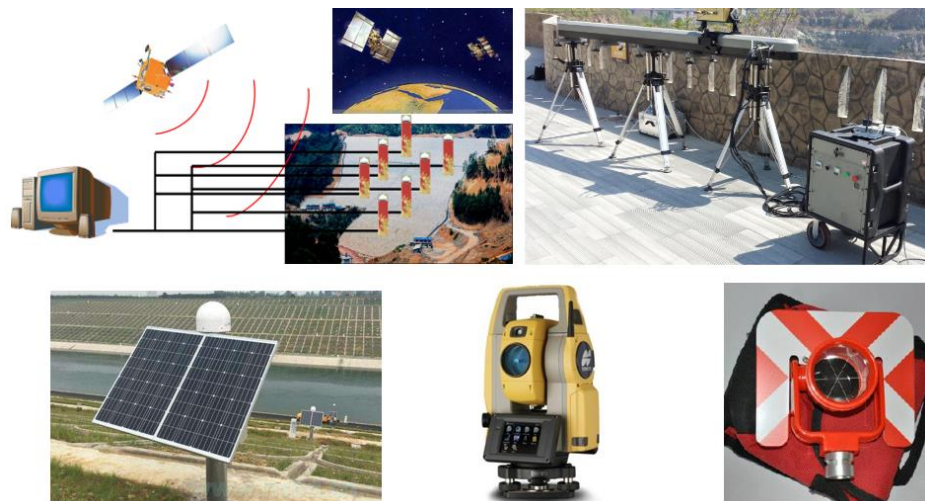
## 四、边坡监测预警经验与展望

边坡是露天矿山的最关键要素，是复杂地质结构体，监测预警建议**四结合**：

- **生产与监测相结合**，充分考虑矿山采剥计划、施工情况等因素的影响；
- **内部与外部相结合**，充分了解边坡工程地质、水文地质条件与坡体外部表征等条件；
- **主-辅监测手段相结合**，以边坡雷达监测为主、GNSS、裂缝计、**无人机巡检**等多手段为辅，相互对比分析与验证；
- **技防与人防相结合**，充分发挥**专家经验**与设备精确测量的联合作用，才能实现精确预警预报。



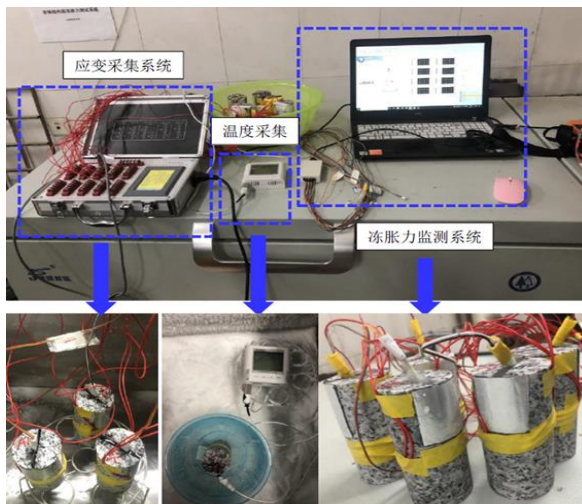
**综上，滑坡监测可以实现成功预警预报，  
风险可防可控！**



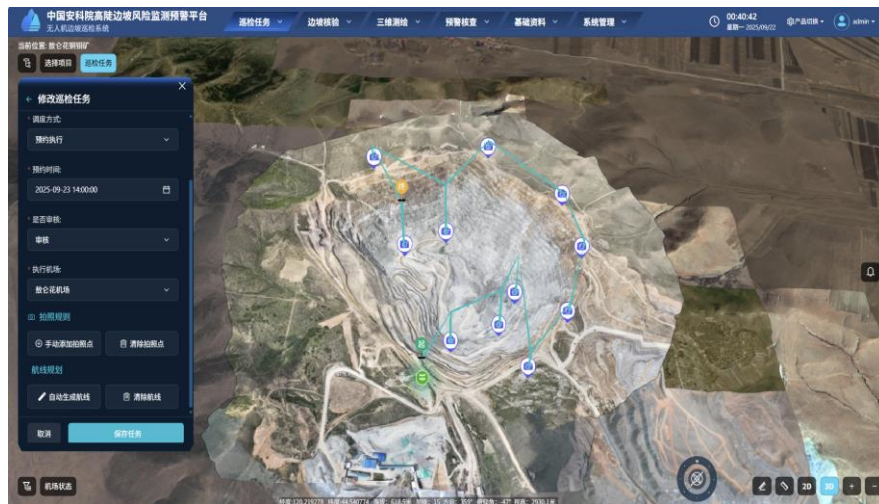
## 四、边坡监测预警经验与展望

### 高寒高海拔矿山边坡监测未来展望

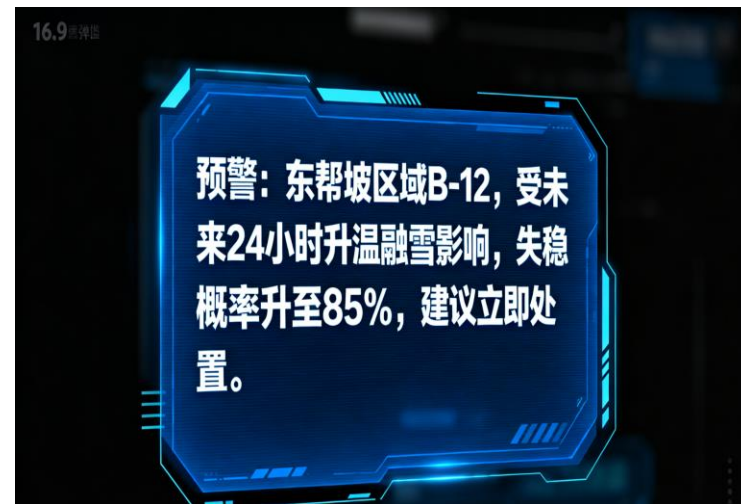
- **三参数预警模型深化：**三参数预警模型考虑冻融循环的影响，进一步提高边坡失稳预警准确性。
- **无人机自动巡检体系：**实现预警触发后的智能测绘、预警核查、形态核验与隐患识别。
- **AI驱动的智能预报技术：**发展基于机器学习的变形预测与失稳概率计算，开发多源监测AI大模型，实现更加精准的边坡失稳时空预报。



冻融循环试验研究



无人机自动巡检



AI智能预报技术

**谢谢， 敬请指导！**

**于正兴**