

于正兴 博士



中国安全生产科学研究院正高级工程师；国家安全生产应急救援勘测队队长；中安国泰（北京）科技发展有限公司总经理

从事露天矿山安全与应急救援研究，主持和参与完成科研项目**58**项，其中“十三五”“十四五”国家重点研发计划课题**3**项；带队参加“2·22”内蒙古阿拉善新井煤矿救援、“12·24”新疆伊犁阿希金矿坍塌事故等重特大事故应急救援**30**余次；发表学术论文**61**篇，其中SCI/EI检索**20**余篇，国家/国际授权专利**20**项，软件著作权**8**项，起草安全生产行业和团体标准**2**项；获应急管理部嘉奖**1**次，获**北京市科学技术一等奖、中国专利优秀奖、冶金矿山科学技术奖特等奖**等省部级奖励**9**项。





露天矿山边坡安全监测预警技术

于正兴 博士/正高级工程师

国家安全生产应急救援勘测队 队长

中安国泰(北京)科技发展有限公司 总经理

2024年10月

一

露天矿山情况简介

二

边坡监测系统建设要求及规范

三

边坡雷达先进监测预警技术

一、露天矿山情况简介

露天矿山：



山坡型



凹陷型



煤矿

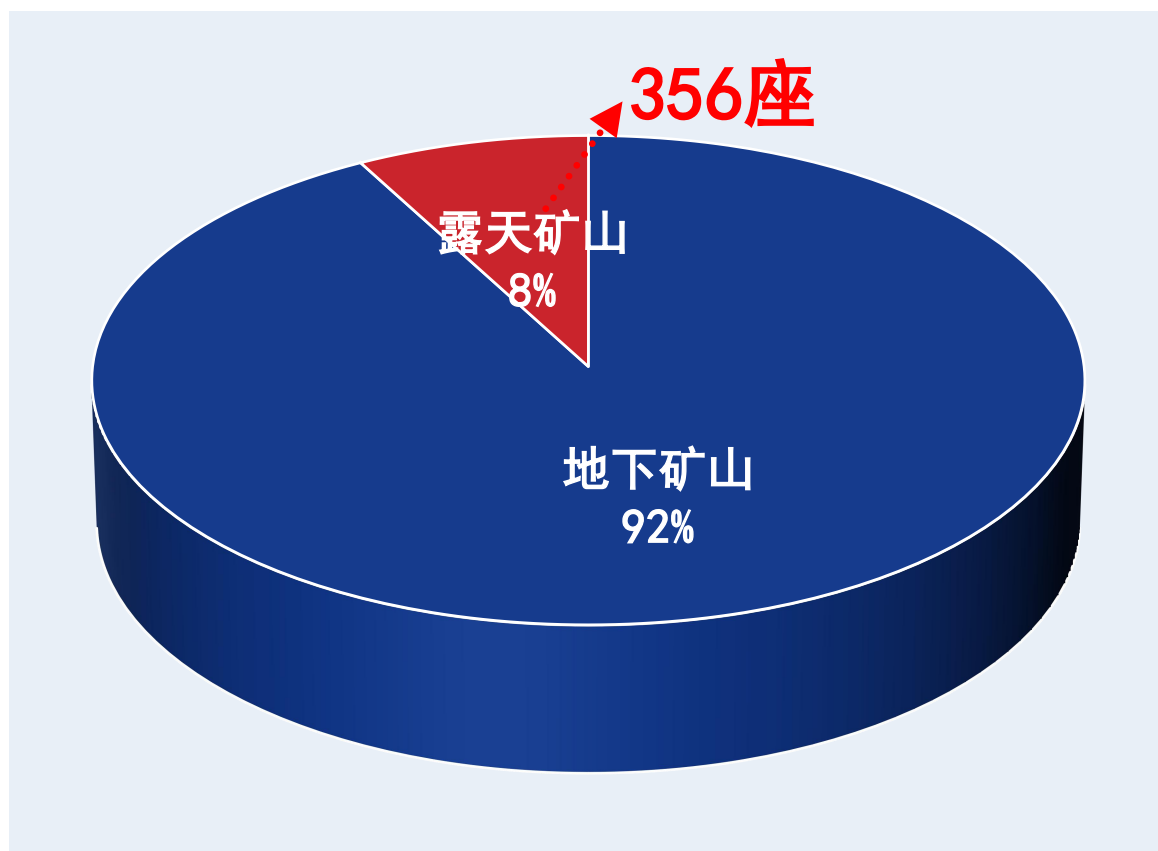


非煤矿

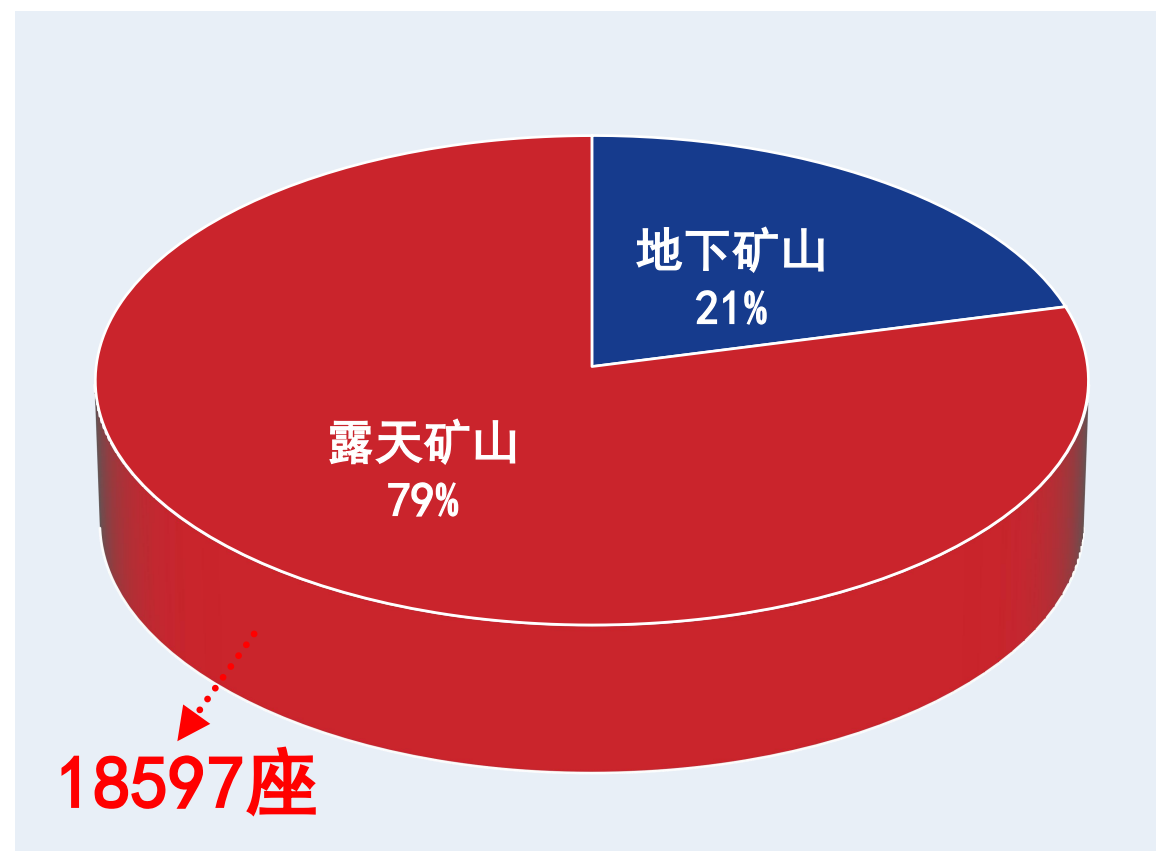
一、露天矿山情况简介

全国露天矿山数量情况：

煤矿



非煤



2023年底统计数据

一、露天矿山情况简介

全国露天矿山较大及以上事故情况：

近20年发生14起露天矿山重特大事故：

➤ 3起为火药爆炸事故

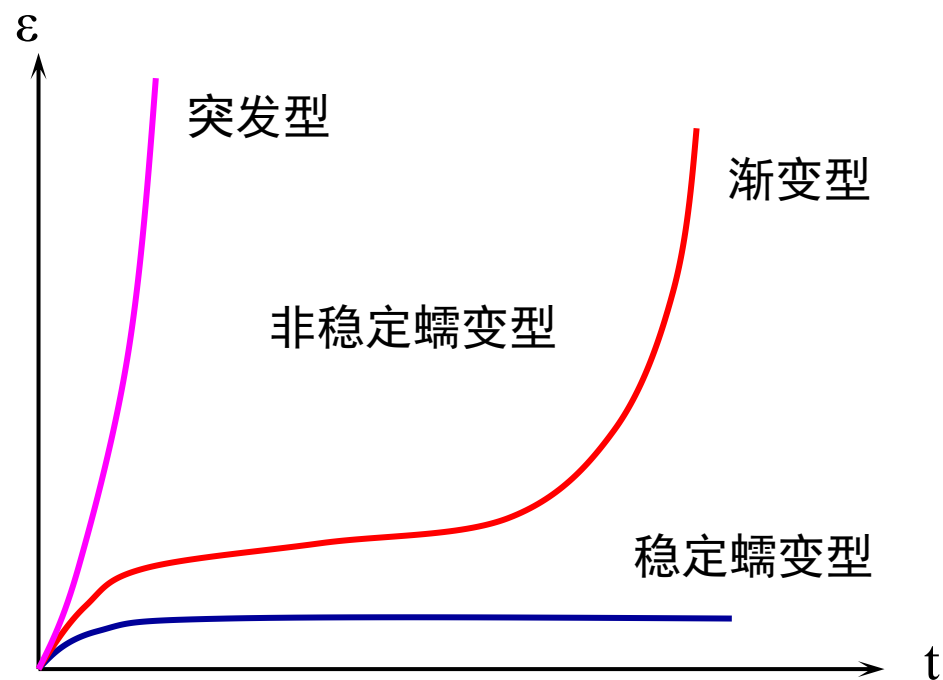
➤ 11起边坡坍塌事故

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”！

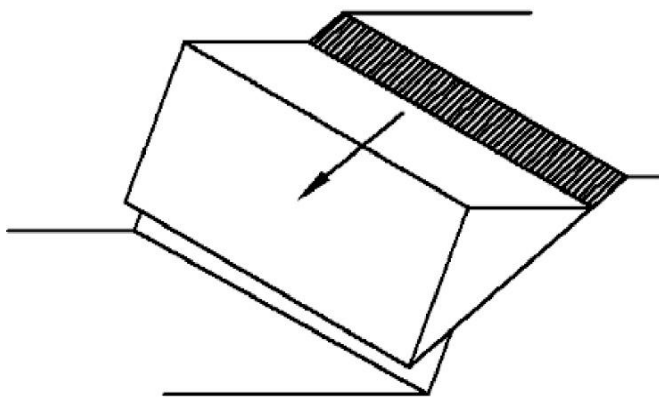
一、露天矿山情况简介

滑坡类型：

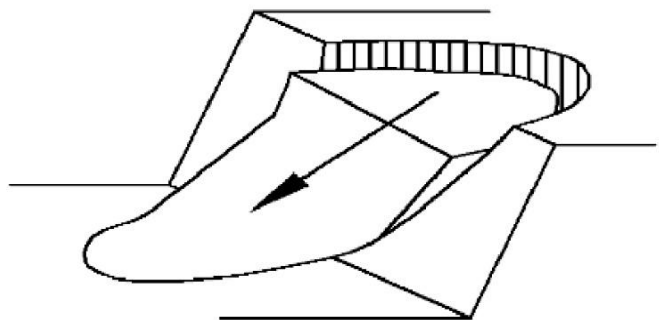
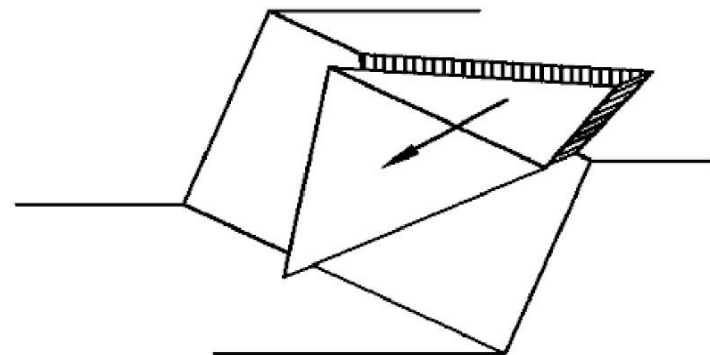


滑坡典型变形曲线

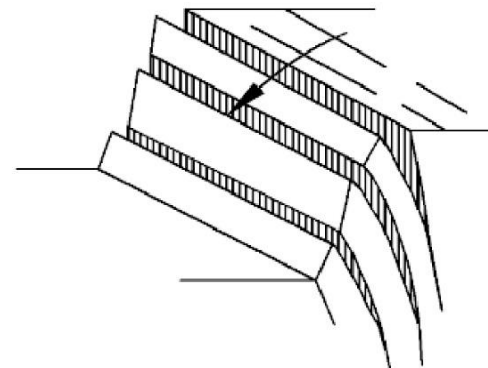
平面滑动破坏



楔体滑动破坏



圆弧滑动破坏

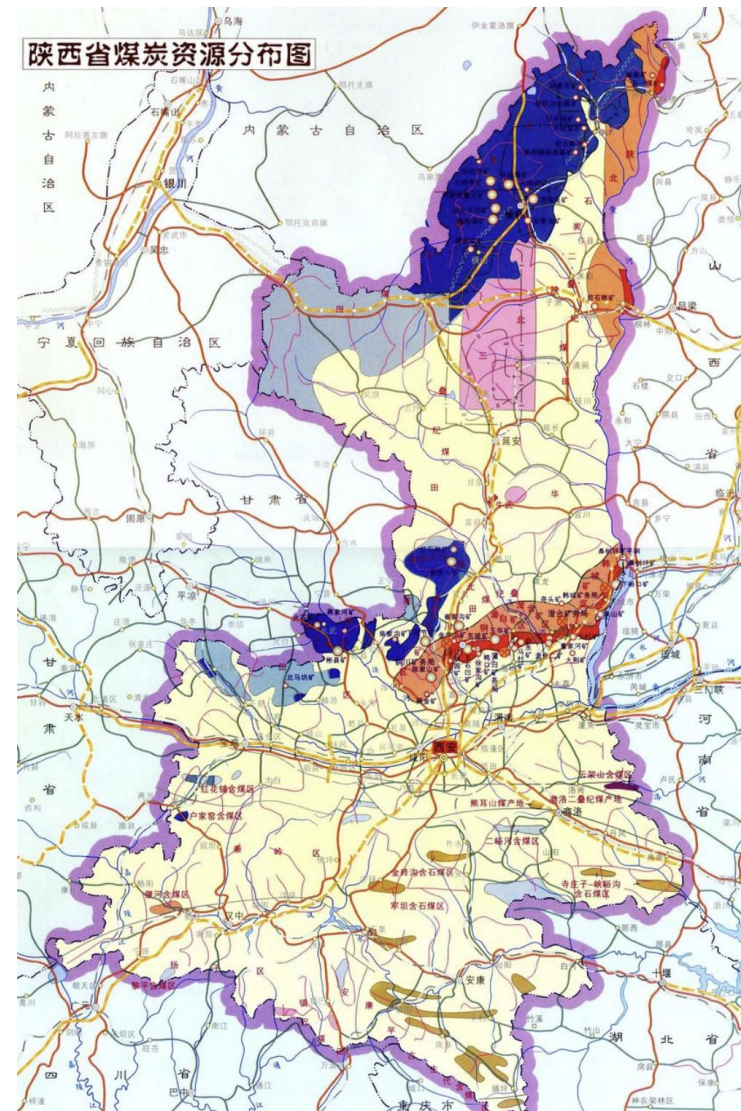


倾倒破坏

一、露天矿山情况简介

陕西省露天矿山情况：

- 陕西省目前拥有露天矿山共**315**座，其中露天煤矿**5**座，非煤露天矿山**310**座。
- 边坡现状高度超过150米的露天矿山**24**座，边坡设计高度超150米的露天矿山**71**座。



一

露天矿山情况简介

二

边坡监测系统建设要求及规范

三

边坡雷达先进监测预警技术

二、边坡监测系统建设要求及规范

《国家矿山安全监察局关于开展露天矿山边坡监测系统建设及联网工作的通知》

矿安〔2023〕119号



国家矿山安全监察局文件

矿安〔2023〕119号

国家矿山安全监察局关于开展露天矿山 边坡监测系统建设及联网工作的通知

各省、自治区、直辖市及新疆生产建设兵团矿山安全监管部门，国家矿山安全监察局各省级局，有关中央企业：

为深入贯彻落实习近平总书记关于安全生产重要指示批示精神，深刻吸取内蒙古阿拉善新井煤业有限公司露天煤矿“2·22”特别重大坍塌事故教训，有效防范和遏制露天矿山重特大事故发生，经研究，国家矿山安全监察局决定开展露天矿山边坡监测系统建设及联网工作。现将有关事项通知如下：

一、工作目标

坚持人民至上、生命至上，深刻吸取近期露天矿山事故教训，

二、边坡监测系统建设要求及规范

119号文要求

建设范围：正常生产建设露天煤矿、边坡现状高度150米及以上的正常生产建设金属非金属露天矿山。

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。

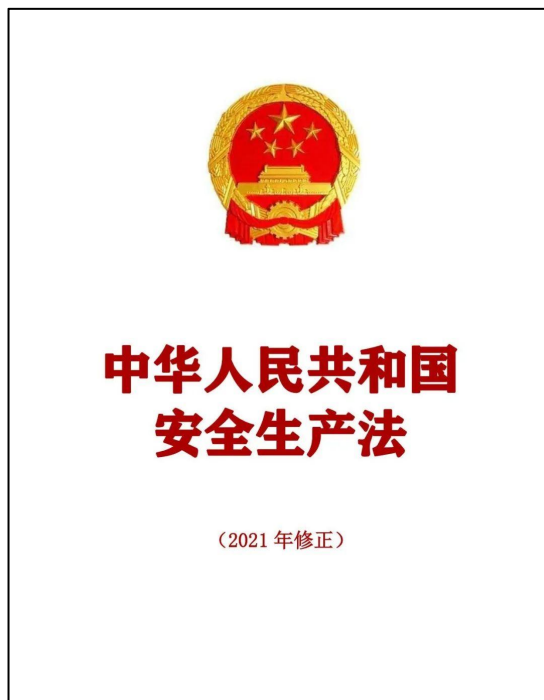
联网要求：



二、边坡监测系统建设要求及规范

119号文要求

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**。



二、边坡监测系统建设要求及规范

119号文条文解读

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规范

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 51289-2018 煤炭工业露天矿边坡工程设计标准

GB / T 37697-2019 露天煤矿边坡变形监测技术规范

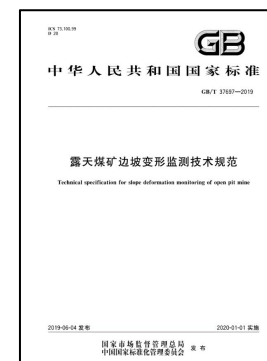
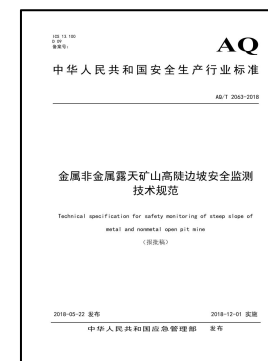
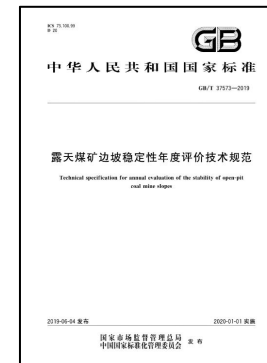
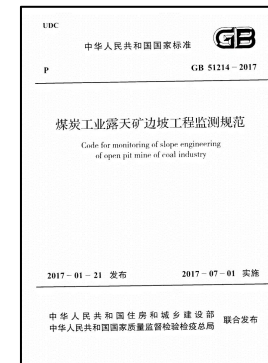
GB / T 37573-2019 露天煤矿边坡稳定性年度评价技术规范

MT / T 1183-2020 露天矿边坡稳定性分析及岩移监测方法

GB 51016-2014 非煤露天矿边坡工程技术规范

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

DB43 / T 2057-2021 矿山边坡生态恢复技术规程



二、边坡监测系统建设要求及规范

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 ^b	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 ^a		质点速度	渗透压力 ^c	地下水位 ^c	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》AQ/T 2063-2018

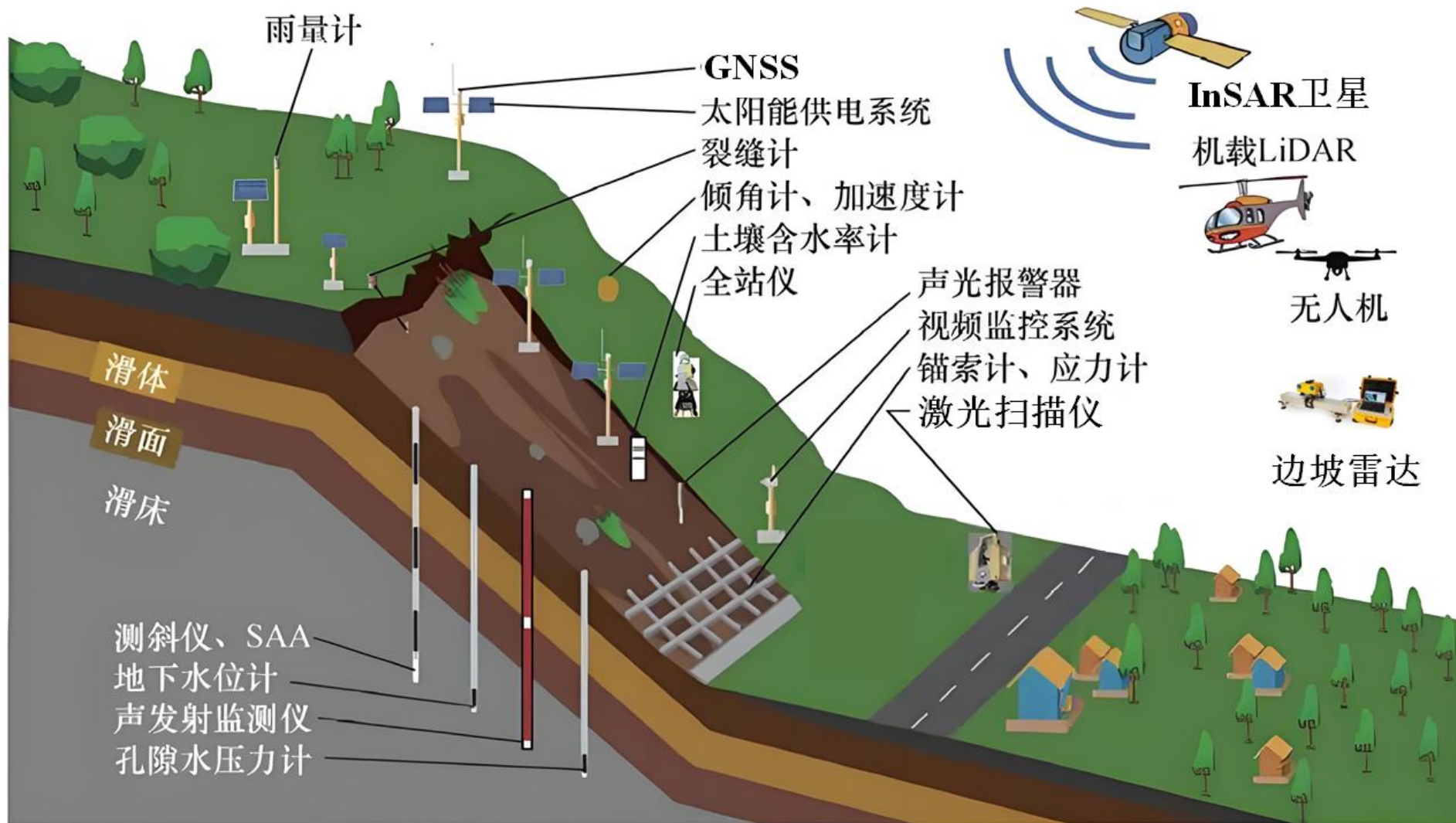
二、边坡监测系统建设要求及规范

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规范

多种监测手段：



二、边坡监测系统建设要求及规范

建设流程：

边坡分区

划分监测等级

确定监测项

选择监测设备

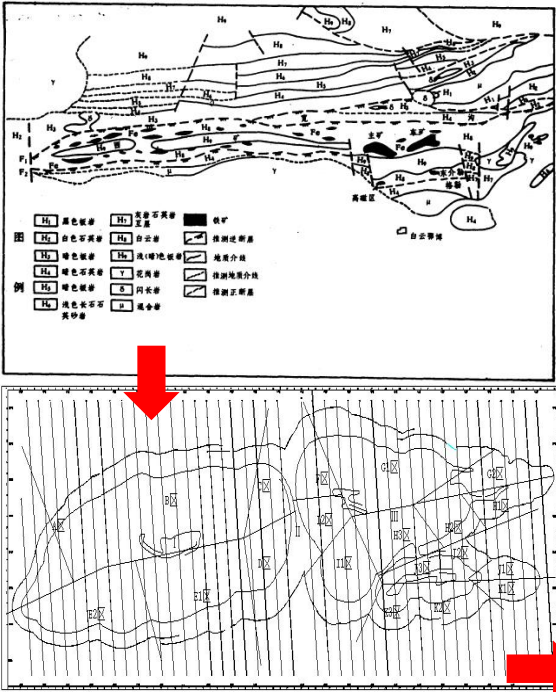
拓扑网络系统

现场安装施工

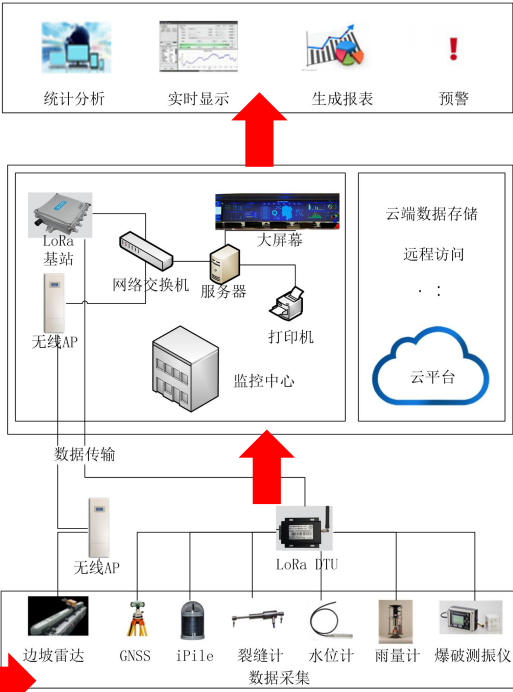
设备试运行

验收

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

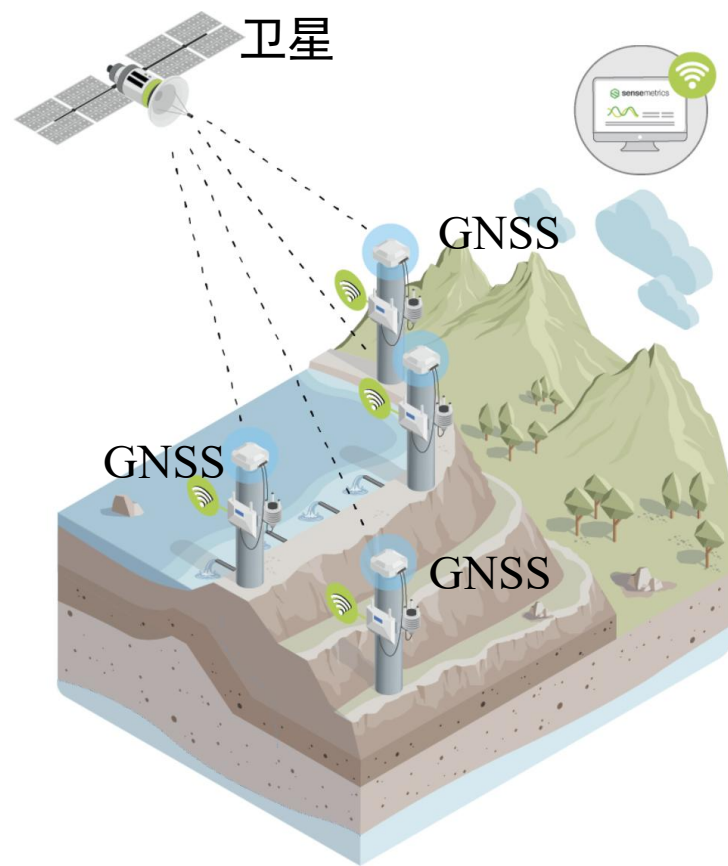


边坡监测系统应当根据露天矿山边坡勘察报告、边坡稳定性研究报告和开采设计等资料，结合采场边坡工程地质复杂程度、水文地质条件、生产和揭露的地质情况及排土场基底地质条件、排弃方式、剥离物构成等情况，分区评估边坡稳定性现状，明确各分区内边坡安全监测等级，按照最终边坡境界、不同时期和不同开采要求进行边坡监测方案总体设计，并按设计要求分阶段进行建设。

二、边坡监测系统建设要求及规范

陕西省露天矿山情况：

经调研，露天矿边坡的表面位移监测主要以GNSS为主，该监测方式主要具有**精度高、实时性强、自动化程度高**等优点。采用GNSS监测虽满足矿安〔2023〕119号文的要求，**但散点式监测难以全面覆盖矿山边坡所有区域，从而导致无法精准确定滑坡风险区域位置及大小！**与边坡雷达面域位移监测手段相比，GNSS更加适用于辅助监测。



露天矿山需联网18座，其中包括露天煤矿3座，非煤露天矿15座，现均已联网至省厅。

一

露天矿山情况简介

二

边坡监测系统建设要求及规范

三

边坡雷达先进监测预警技术

三、边坡雷达先进监测预警技术

- 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。
- 2013年4月10日，宾汉姆铜矿发生了北美有历史记录以来最大的非火山活动原因滑坡，滑坡岩土量约为6500-7000万 m^3 。在滑坡的几个个月前，该矿安装了边坡雷达系统，并在滑坡前7小时发出了安全警报。之后矿井停止生产，所有工人紧急疏散，无一人受伤。



- 事实证明，边坡滑坡是可以预测预报的。

三、边坡雷达先进监测预警技术

边坡雷达

天线制式分类

真实孔径雷达

合成孔径雷达

承载平台分类

地基边坡雷达

天基边坡雷达

空基边坡雷达

体制分类

大锅式边坡雷达

轨道式边坡雷达

阵列式边坡雷达

旋转式边坡雷达



三、边坡雷达先进监测预警技术

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）

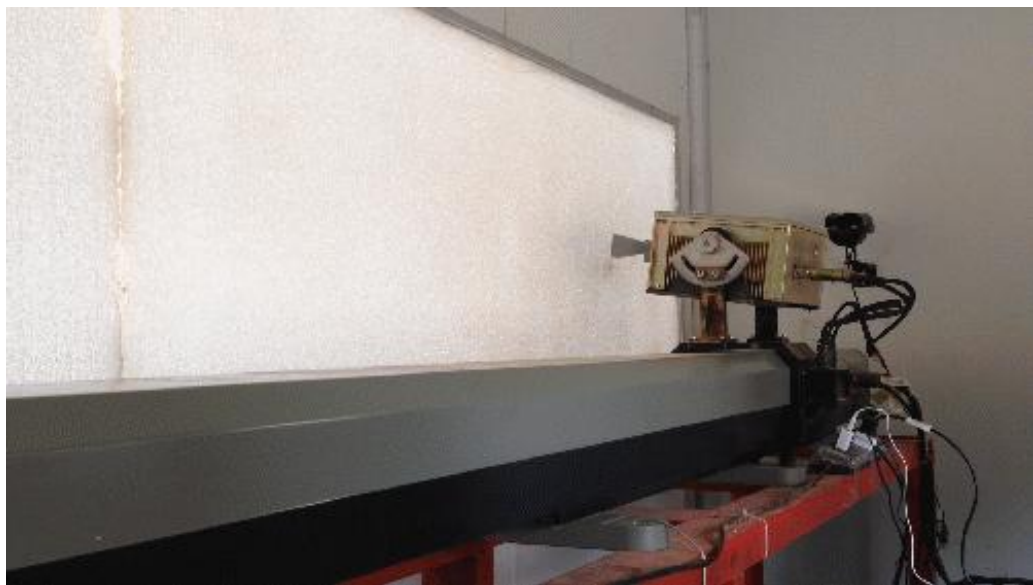
高精度（亚毫米级）

大范围（ $\geq 5\text{km}$, 120° ）

无接触（遥感监测）

高分辨率

快速连续（ $\leq 10\text{min}$ ）



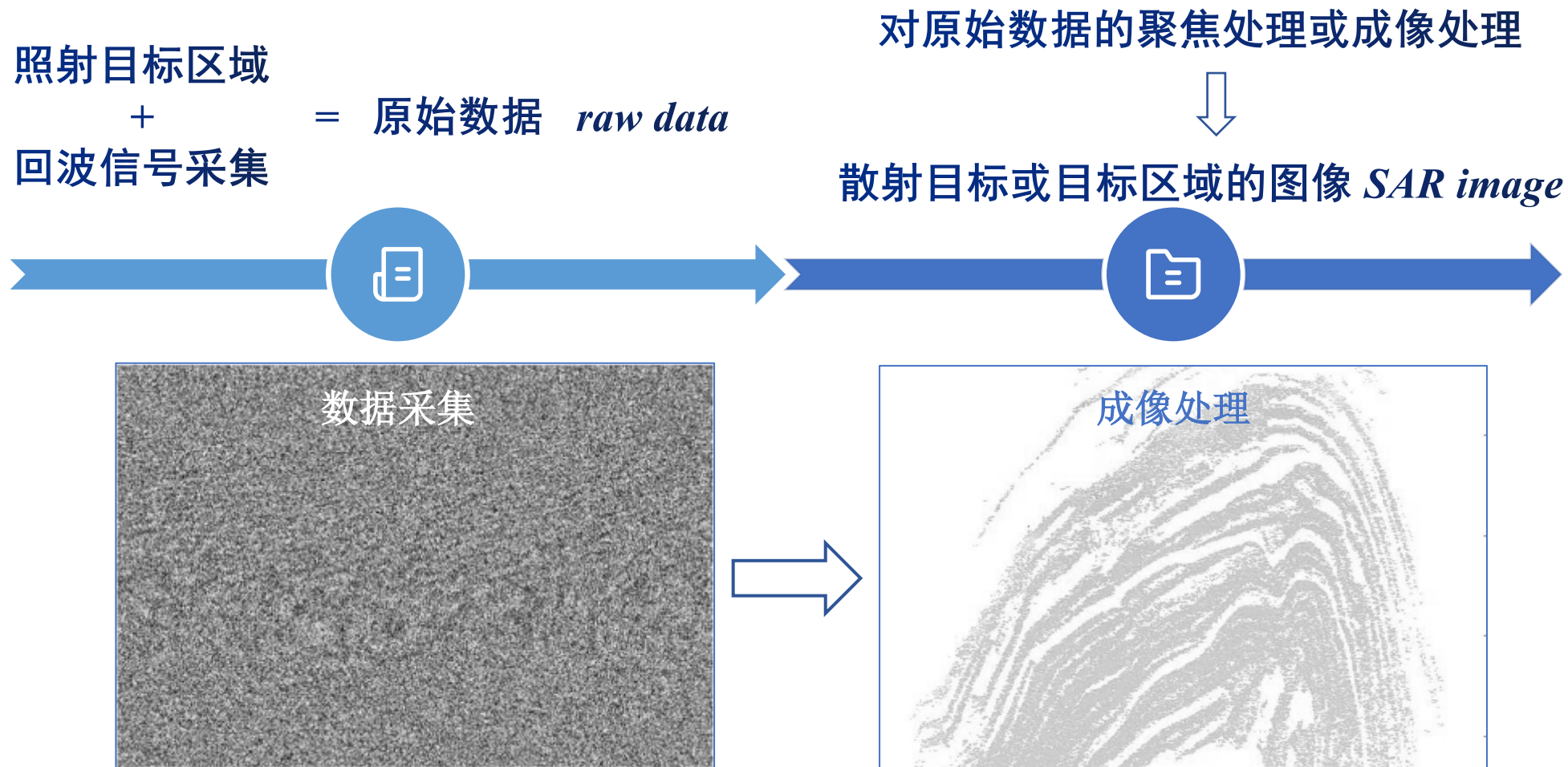
移动过程中的雷达射频前端



利用运动合成一个“大口径”天线，增强分辨率

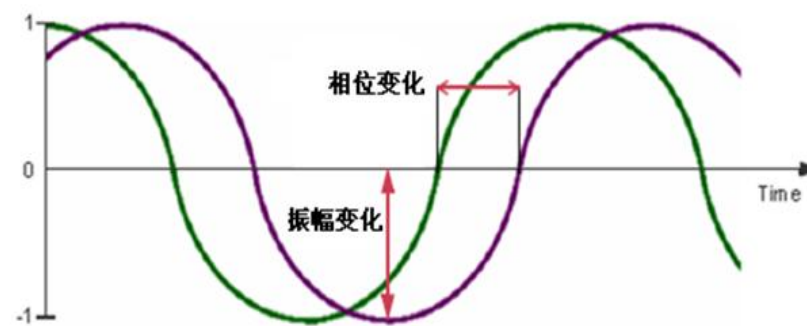
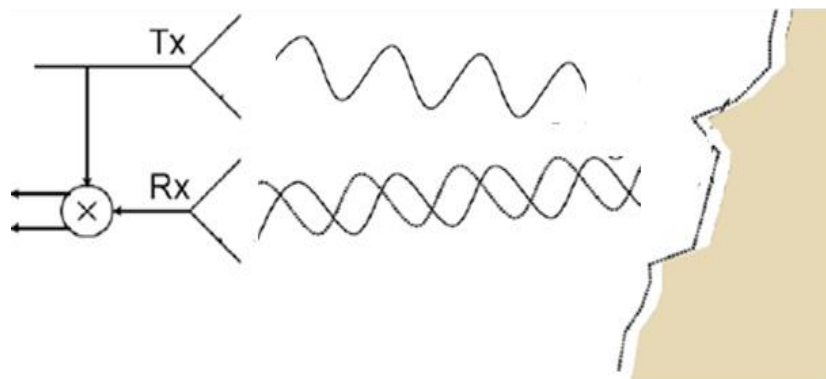
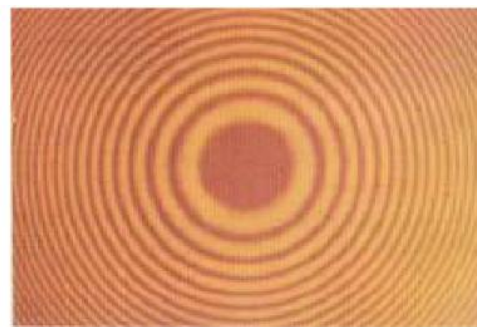
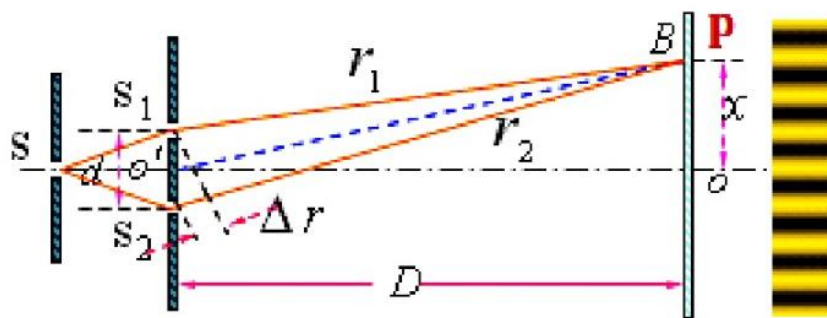
三、边坡雷达先进监测预警技术

- SAR成像包括：数据采集+成像处理



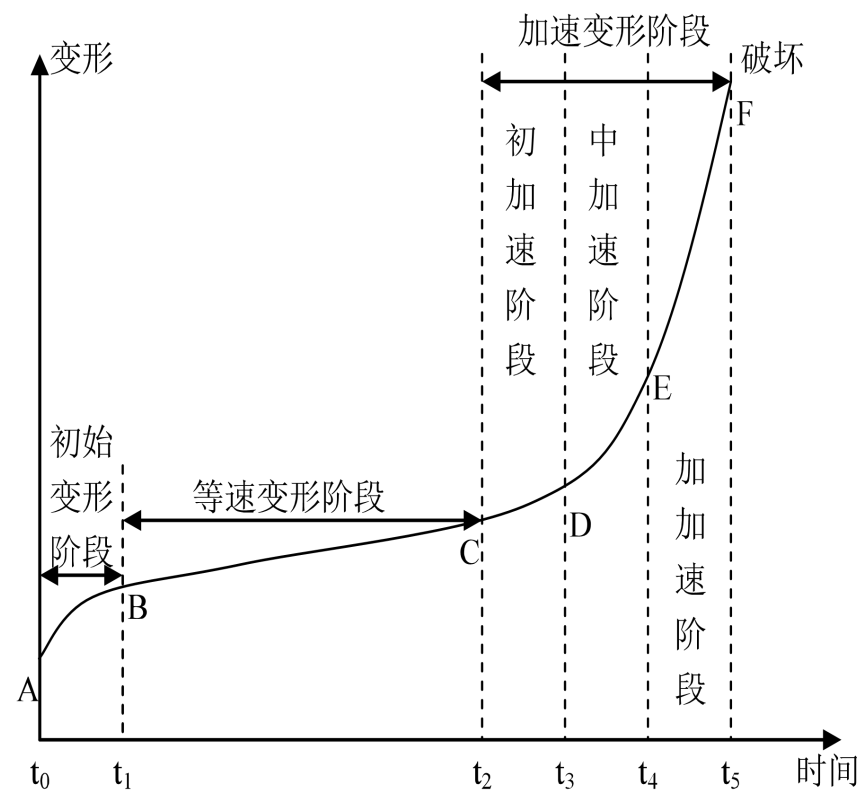
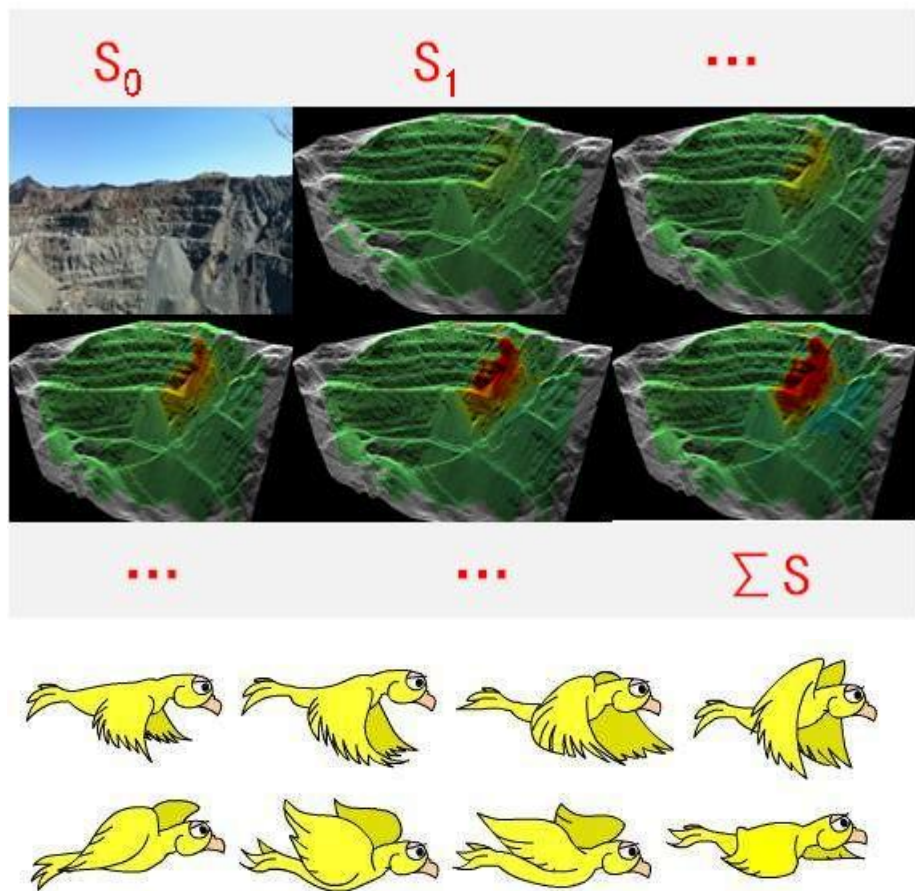
三、边坡雷达先进监测预警技术

- 合成孔径边坡雷达监测的基本原理是利用雷达波对边坡进行干涉测量，从而测定边坡变形量。
- 干涉测量是通过波的叠加引起的干涉现象来获取信息的技术。
- 通过比较雷达接收信号的相位变化，可以计算边坡微小的连续位移。



三、边坡雷达先进监测预警技术

- 将干涉结果进行累加，可获得一段时间内的位移曲线，进行滑坡分析。



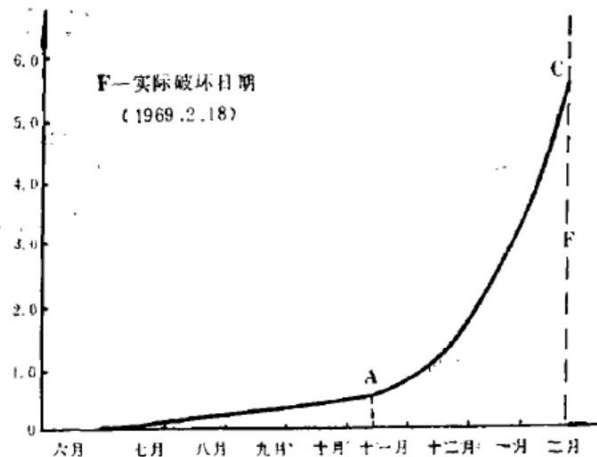
三、边坡雷达先进监测预警技术

- 以“**速度-面积-持续时间**”三参数法量化预警指标，兼容多种滑坡预警模型，包括黄金分割法、斋藤法、切线角法、速度倒数法等。

黄金分割法

提出者：张倬元、黄润秋

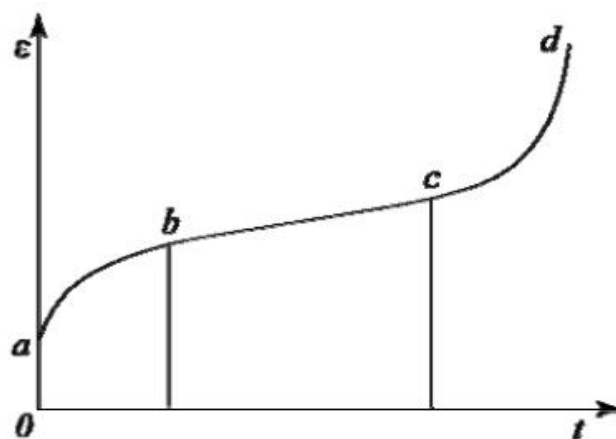
核心思路：线性变形阶段与非线性变形阶段的比值接近黄金分割点 (0.618)



斋藤法

提出者：斋藤迪孝

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

三、边坡雷达先进监测预警技术

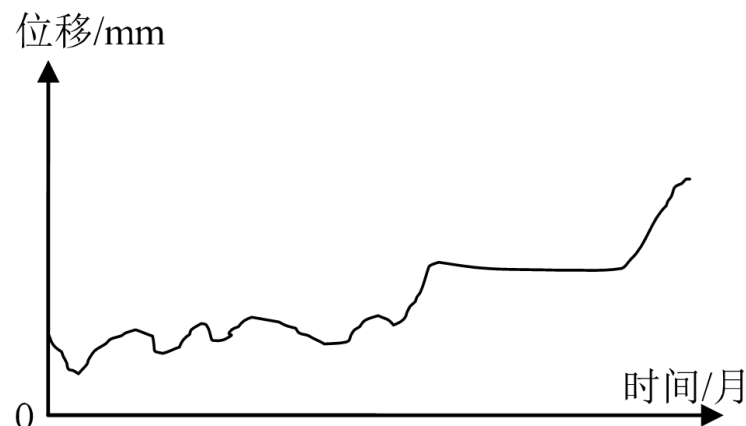
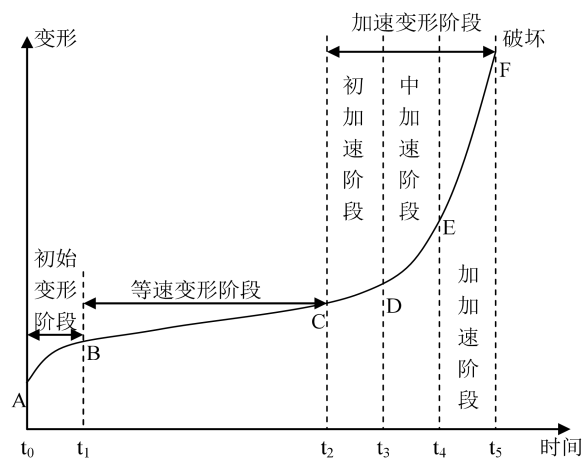
➤避免过于迷信监测设备，不要追求绝对预警阈值！

实际上，滑坡临界变形速率差距非常大！0.1mm/d到800mm/d都可能发生滑坡。如：黄土边坡0.1mm/d；岩质边坡1mm/d至40mm/d；堆积土2mm/d至200mm/d都可能发生滑坡。

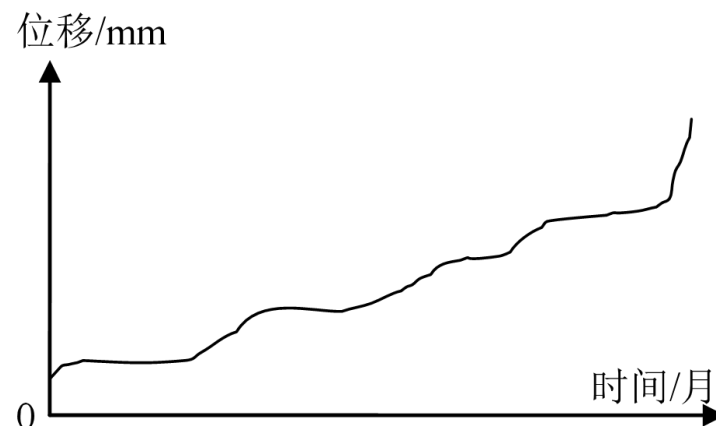
矿安〔2023〕119号文：预警值应结合年度边坡稳定性分析报告设置，并根据实际情况动态更新，至少每半年核定一次。年度边坡稳定性分析报告应设立专章分析近一年的边坡监测情况，并提出下一年度预警值设置建议。

三、边坡雷达先进监测预警技术

➤ 滑坡变形曲线千变万化，预警参数需量身定制！



(a) 振荡型滑坡



(b) 阶跃型滑坡

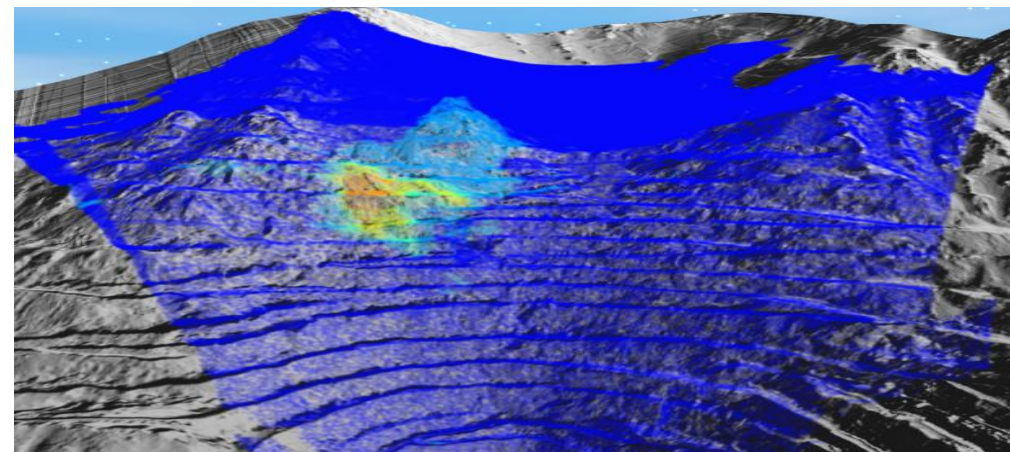
矿安〔2023〕119号文：边坡监测系统应当根据**露天矿山边坡勘察报告、边坡稳定性研究报告和开采设计等资料**，结合采场边坡工程地质复杂程度、水文地质条件、生产和揭露的地质情况及排土场基底地质条件、排弃方式、剥离物构成等情况，分区评估边坡稳定性现状，明确各分区内边坡安全监测等级，按照最终边坡境界、不同时期和不同开采要求进行边坡监测方案总体设计，并按设计要求分阶段进行建设。

三、边坡雷达先进监测预警技术

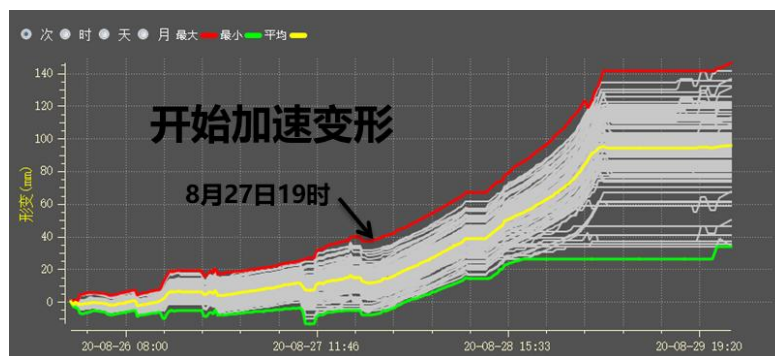
成功预警案例1：2020年8月，基于速度倒数法预测了新疆和静备战铁矿高变形区域于**29日9时-10时**发生滑坡，实际滑坡时间为**29日10时**，实现精确预警预报。



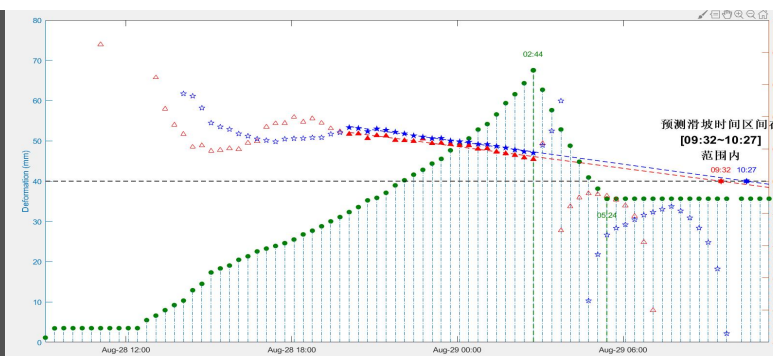
拖车雷达监测边坡的现场情况



雷达监视云图情况



滑坡区域位移变形曲线



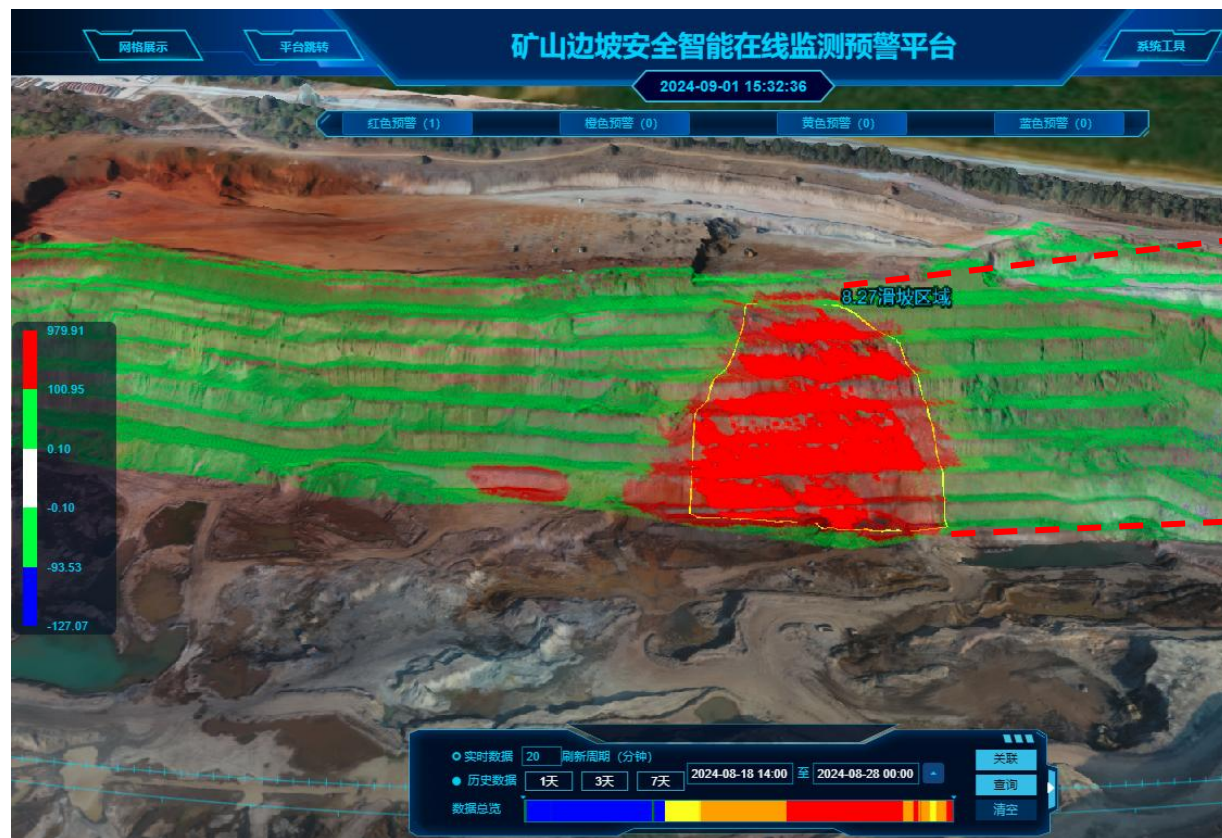
速度倒数法滑坡预测模型



现场滑坡情况

三、边坡雷达先进监测预警技术

成功预警案例2：2024年8月24日，基于**速度-面积-持续时间“三参数”**预警模型，刚果金迪兹瓦铜钴矿边坡触发红色预警，随后发生**7个台阶近7000平方米**的大面积滑坡。

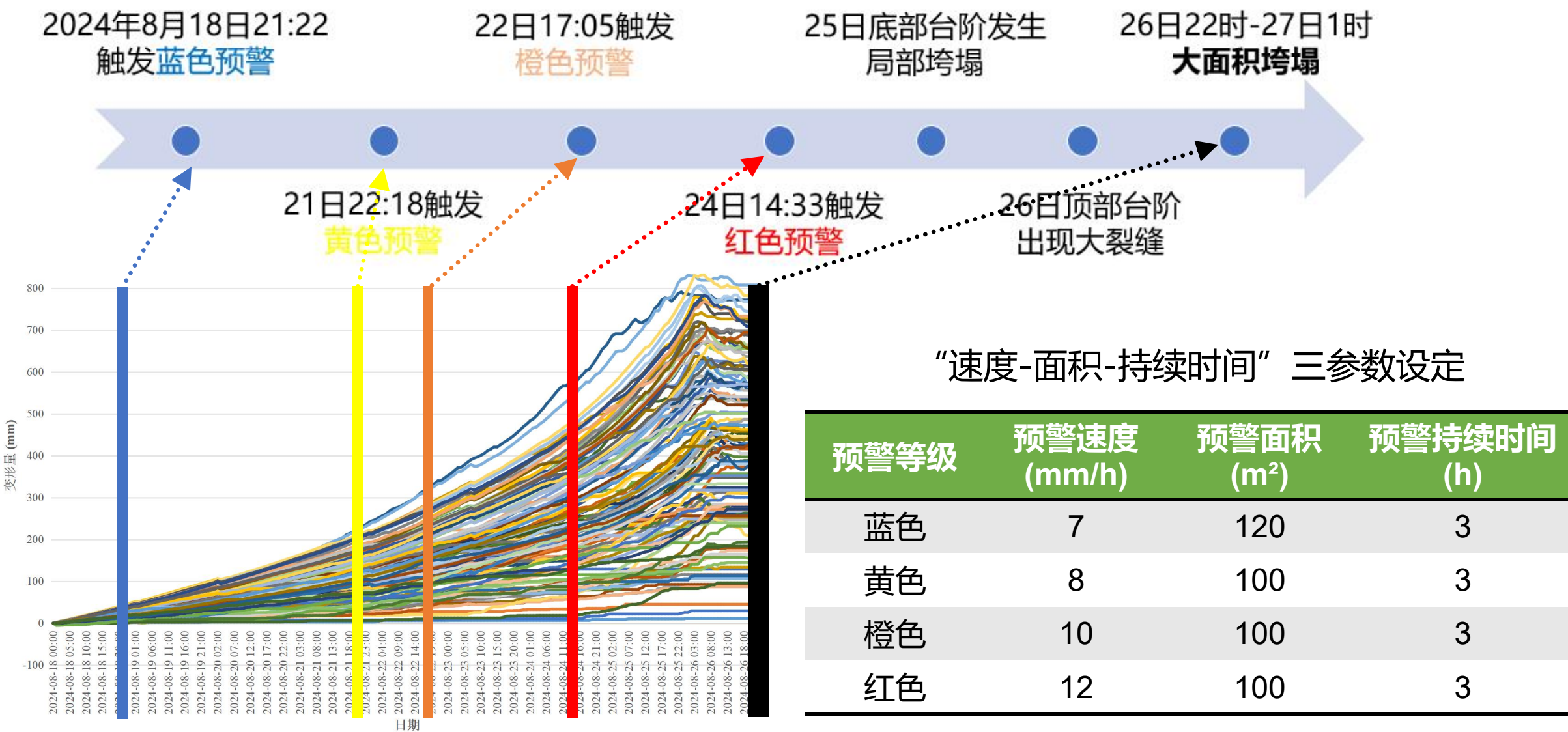


临滑前红色预警范围



滑坡现场情况

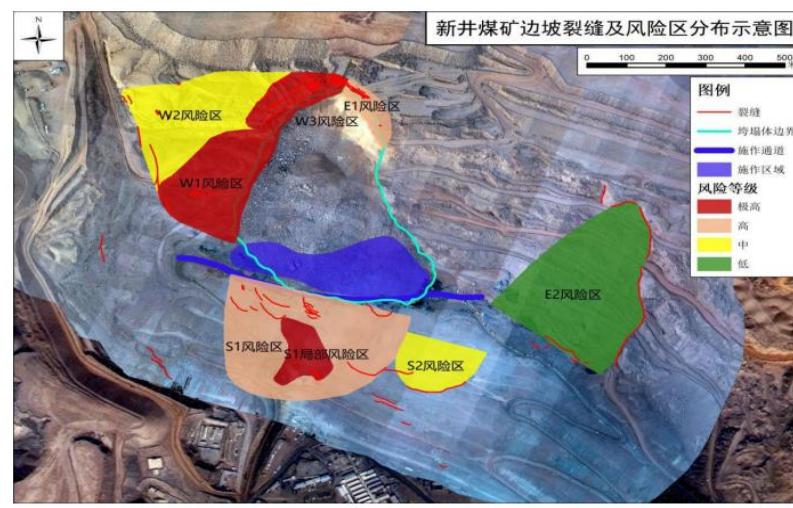
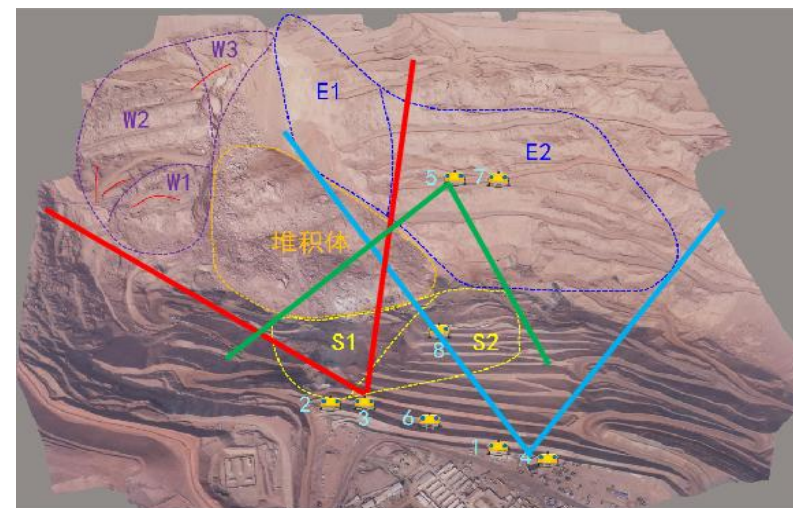
三、边坡雷达先进监测预警技术



迪兹瓦铜钴露天矿山滑坡预警全过程

三、边坡雷达先进监测预警技术

成功预警案例3：2023年2月22日，内蒙阿拉善左旗新井煤矿滑坡事故，现场技术监测保障，成功监测预警**16次**不同程度坍塌，最大坍塌方量达**数千立方**。

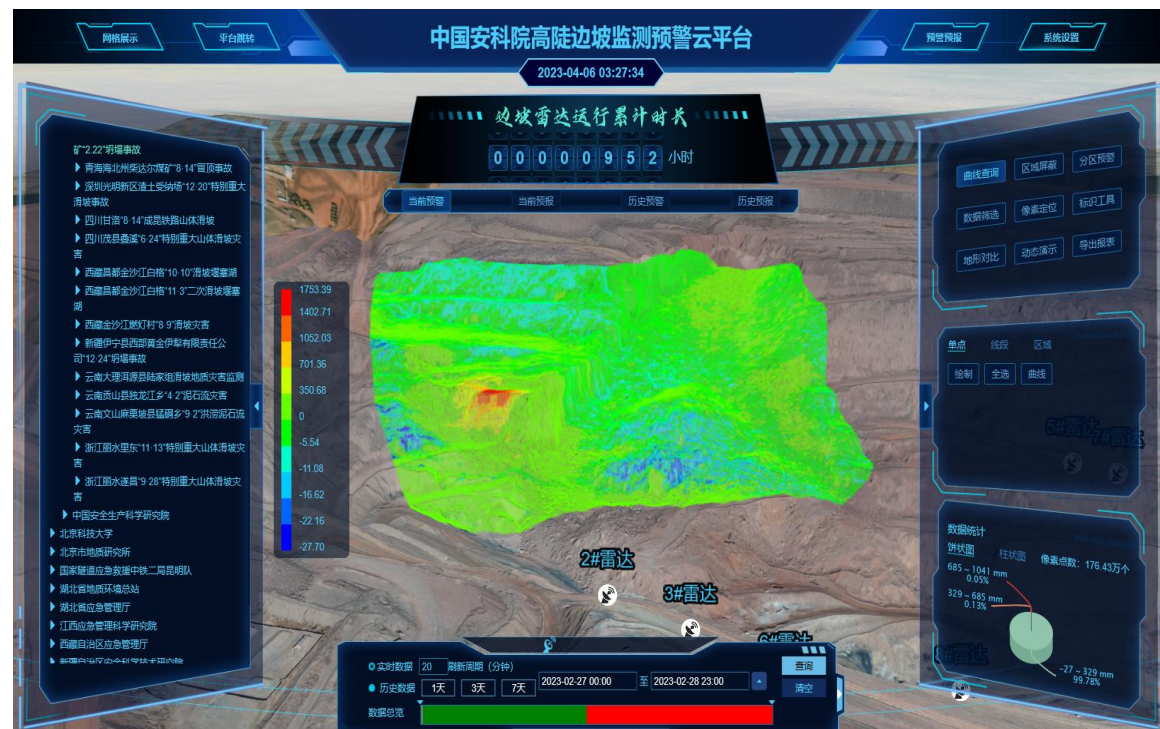


三、边坡雷达先进监测预警技术

新井煤矿滑坡事故应急监测：

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



三、边坡雷达先进监测预警技术



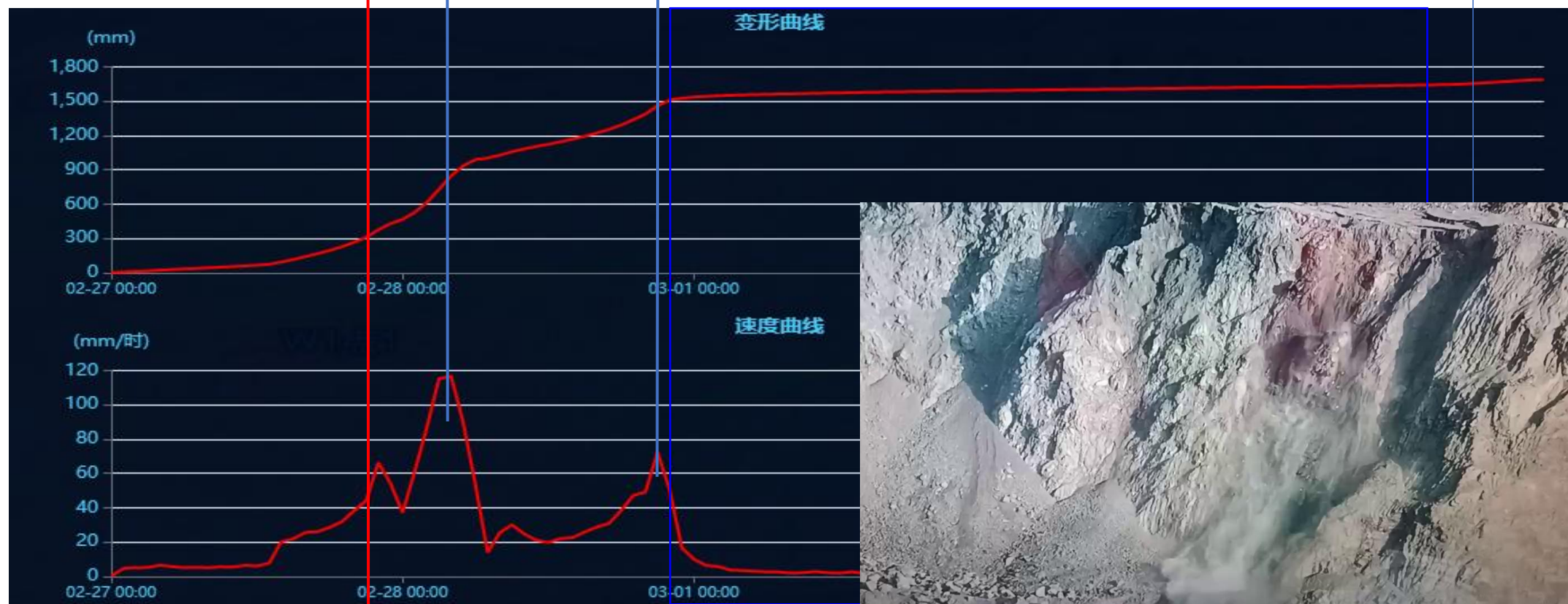
2月27日20时28分指
挥部发出撤离通知

1.满足预警原则 2.夜间施工作业 3.滑动体机理不明

W1区域

2月28日3时, 120mm/h,
速度降低至20mm/h

2月28日23时,瞬时速度达到近80mm/h,然后趋
于平缓, 低于5mm/h



成功监测预警16次不同程度坍塌, 最大坍塌方量达数千立方

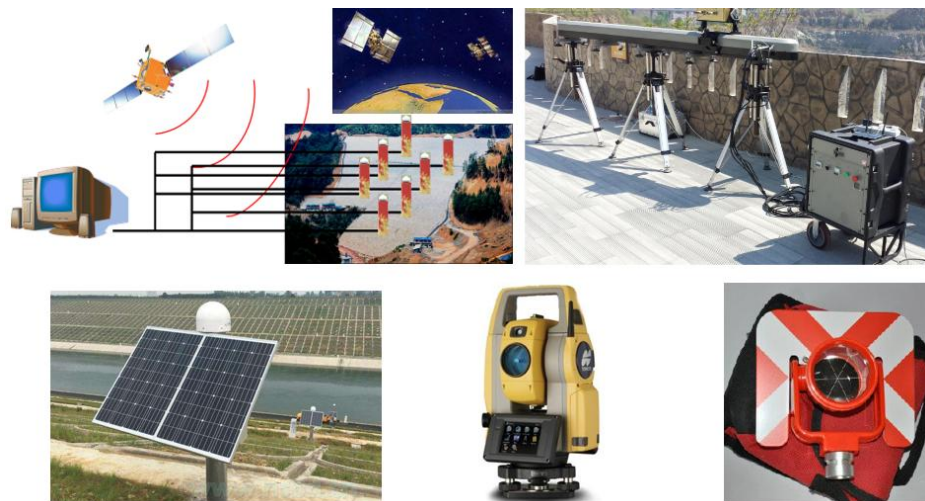
三、边坡雷达先进监测预警技术

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**，充分发挥工程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！**



谢谢，请指导！