



中国煤炭科工集团  
煤炭科学技术研究院有限公司  
CCTEG CHINA COAL RESEARCH INSTITUTE

# 高海拔高寒露天矿地质 灾害链协同防治技术

主讲人：杜 涵

单位： 煤炭科学技术研究院

2025年12月2日



1

## 科学背景与意义



## 2 高寒高海拔区域露天矿边坡防治的前沿方向

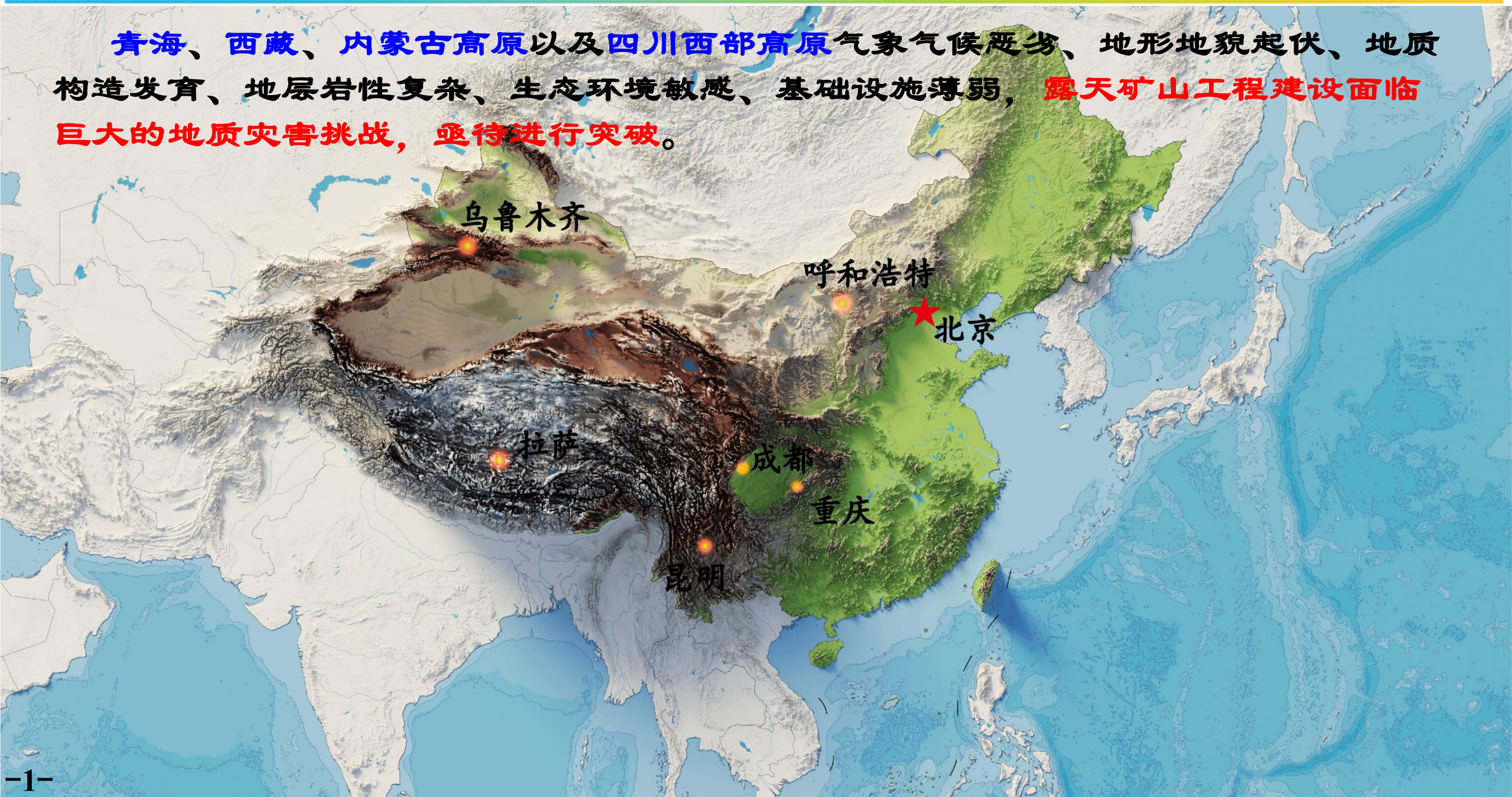


3

## 多场关联监测与预报



青海、西藏、内蒙古高原以及四川西部高原气象气候恶劣、地形地貌起伏、地质构造发育、地层岩性复杂、生态环境敏感、基础设施薄弱，露天矿山工程建设面临巨大的地质灾害挑战，亟待进行突破。





边坡高度**200m**以上矿山（**2024年10月**数据）：

➤数量越来越多

➤ **2007**年：**26**座

➤ **2023**年：**336**座

➤边坡角越来越陡

➤ **2007**年：大于 **42°** 的占比为**73%**

➤ **2023**年：大于 **42°** 的占比为**92%**

➤开采规模越来越大

➤ **2007**年：超过**1000**万吨的**5**座

➤ **2023**年：大于 **42°** 的占比为**92%**



金属非金属露天矿山**14951**处



露天煤矿**356**处



1

科学背景与意义

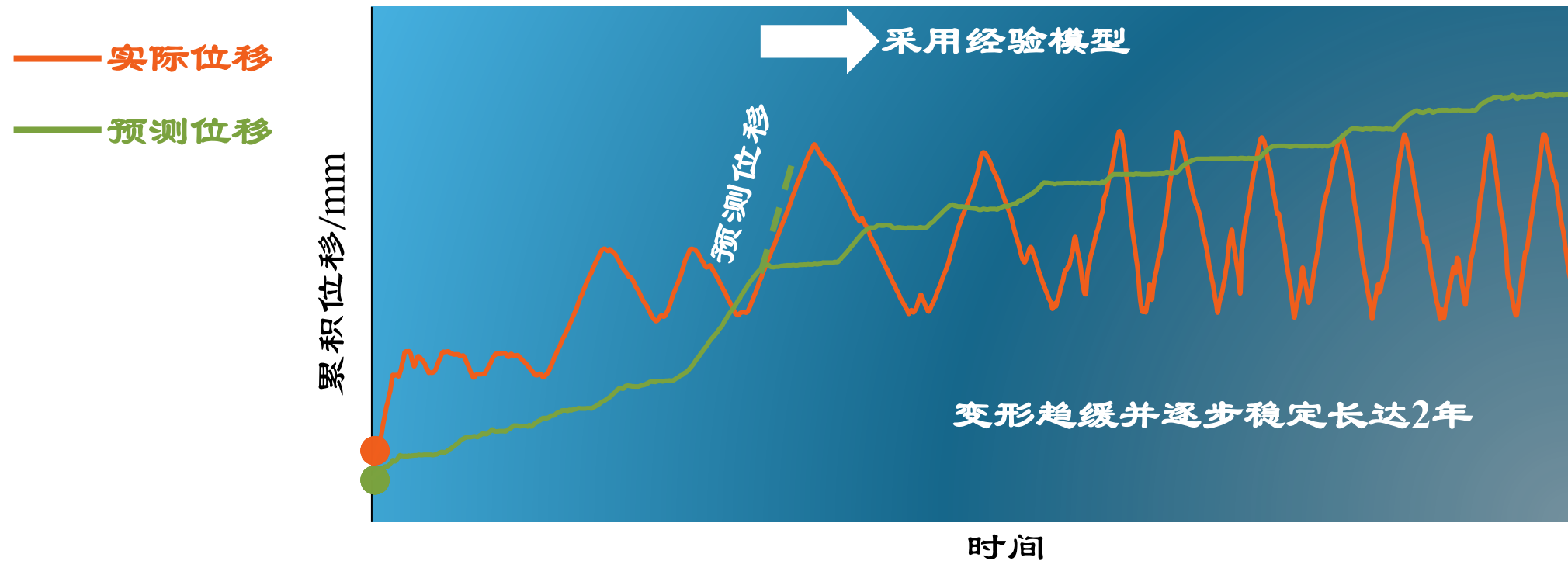


**2 高寒高海拔区域露天矿边坡防治的前沿方向**



3

**多场关联监测与预报模式**



蒙东地区某大型露天煤矿顶帮垮落

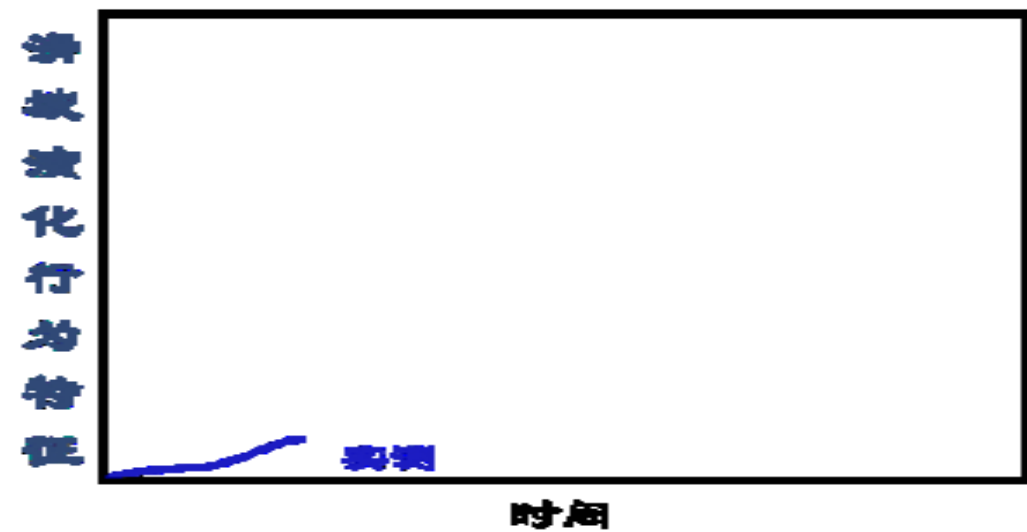


基于露天煤矿边坡滑坡全过程动力演变规律，提出了滑坡演化阶段判识的三个重要标准：

- 采矿工程准则
- 多场监测准则
- 数值模拟准则

实现了露天矿滑坡全过程准确判识

变形阶段	变形速度	稳定系数	现场观测指标
稳定状态	零速率	$> 1.1$	滑坡体无明显变形，无地裂缝
弱/较强 变形状态	等速变形	$1.1-1.04$	主滑带裂缝逐渐扩大、后缘地表出现地裂缝、坡体中上部出现下沉
强变形状态	加速变形	$1.04-1.01$	主滑段和牵引滑面形成、坡体前移、后缘主缝贯通、前缘地面隆起
临滑状态	急剧变形	$1.01-1.0$	滑体整体向下滑移、抗滑段滑面贯通、前缘坍塌



□ 提供一个量化的识别和检验框架，采用幂律分布理论为解释、预测和管控这些罕见但影响巨大的事件（高寒高海拔天气下露天矿边坡互动）提供了有价值的分析工具，并结合多源数据监测耦合强度、不同位置边坡位置形变、形变几何复杂性及边坡动力学数值模拟呈现的失稳形变破坏探讨了可能导致这些特殊事件产生的响应机制。

公式1: Gamma分布

$$f_X(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x} (x > 0)$$

公式2: Lognormal分布

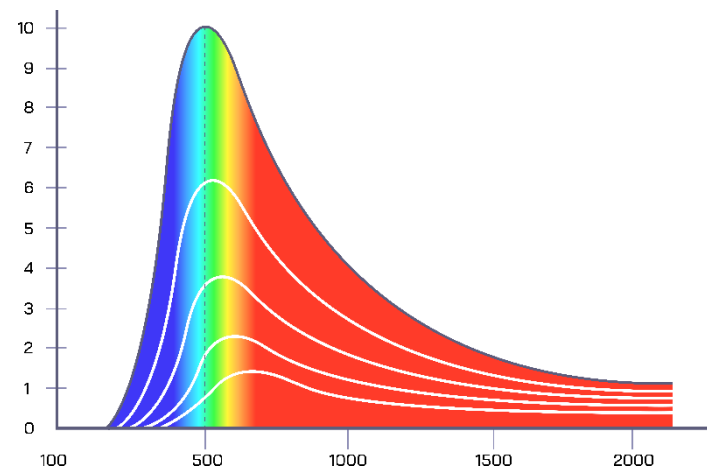
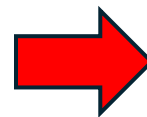
$$f_X(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[\ln(x) - \mu]^2}{2\sigma^2} \right\} (x > 0)$$

公式3: Log-logistic分布

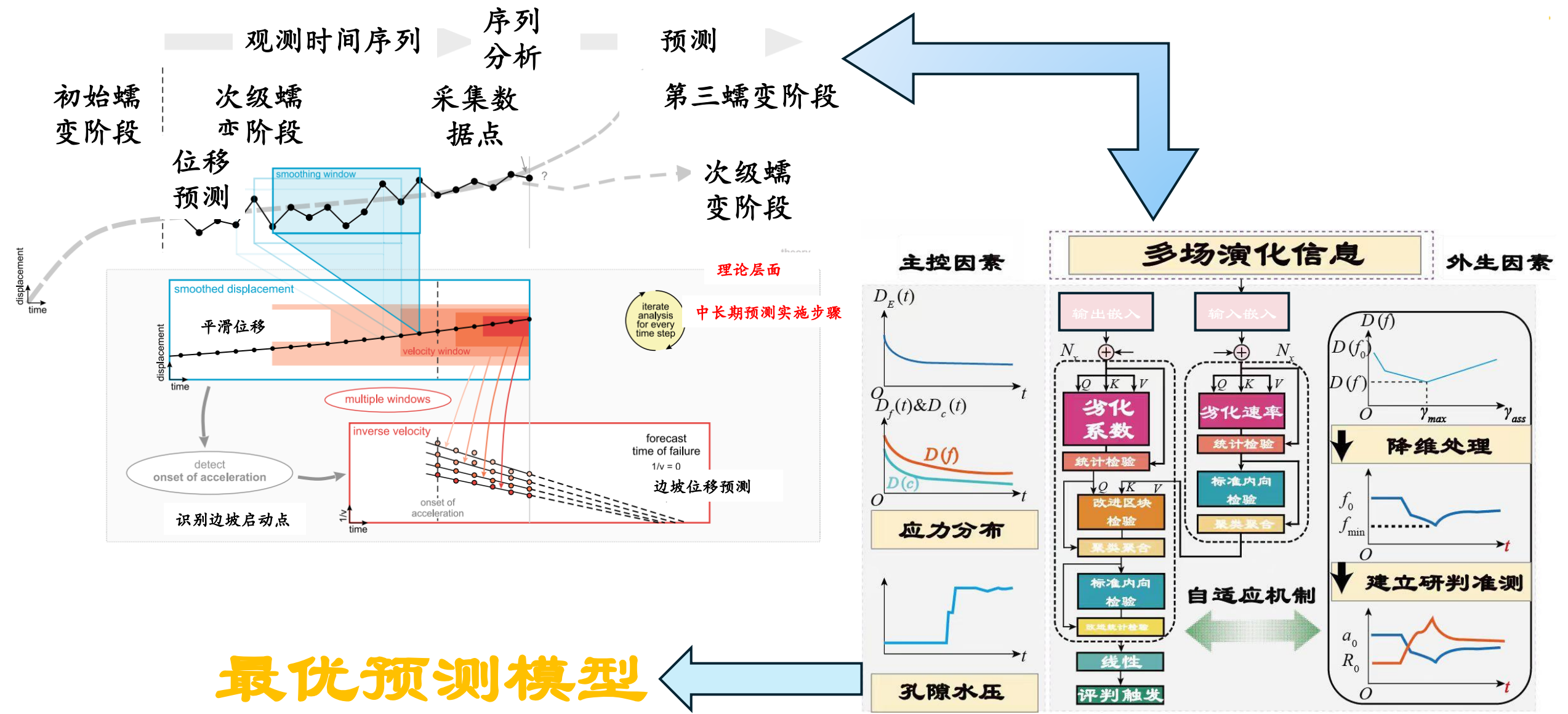
$$f_X(x; \alpha, \beta) = \frac{(\beta / \alpha)(x / \alpha)^{\beta-1}}{[1 + (x / \alpha)^\beta]^2} (x \geq 0)$$

公式4: Logistic分布

$$f_X(x; \mu, s) = \frac{e^{-(x-\mu)/s}}{s[1 + e^{-(x-\mu)/s}]^2}$$









1

科学背景与意义



2 高寒高海拔区域露天矿边坡防治的前沿方向



3

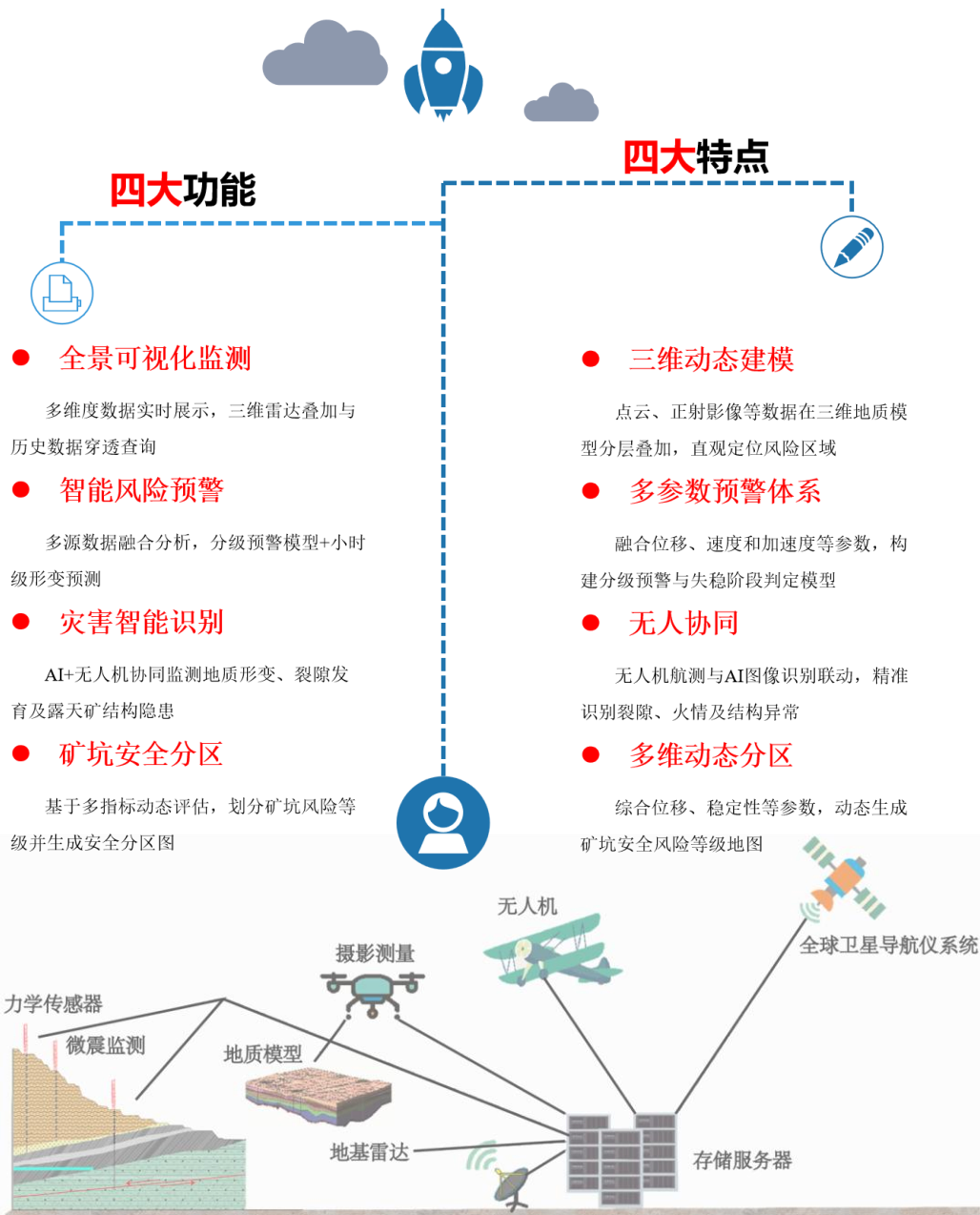
多场关联监测与预报

### 三、多场关联监测与预报



突破了边坡灾害监测预警领域长期存在的多源数据融合难题，能够对目前市面上几乎所有监测设备的异构数据进行全覆盖兼容处理，实现边坡多源监测数据的集约化和高效化“智眼”管理。

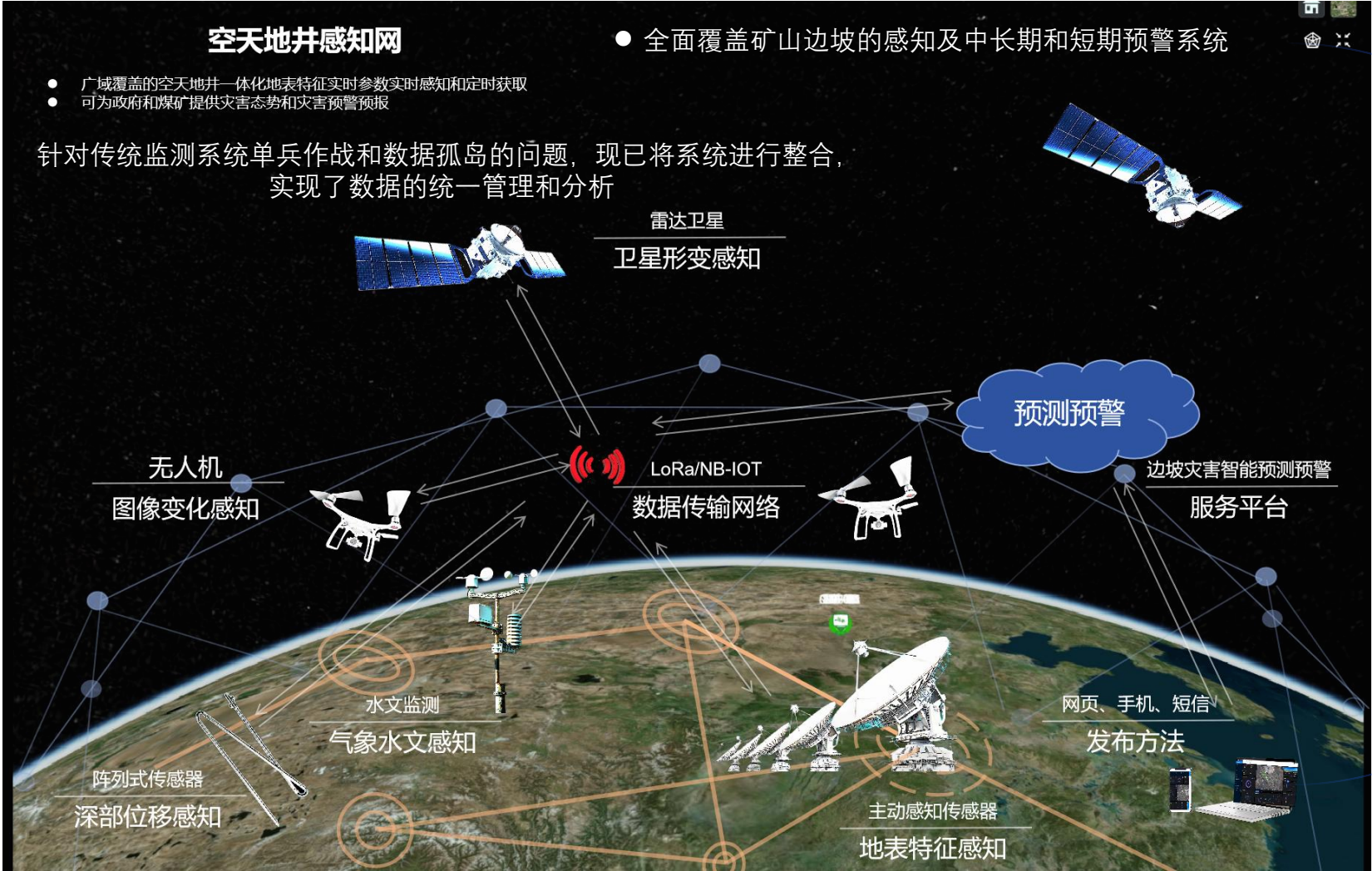
系统以“数据驱动”为核心，通过大数据智能算法分析和机器深度学习等手段，根据边坡变形监测数据，优化判别机制，串联**中长期和短期临滑预警**分析，构建了露天煤矿的多设备、多参数联动综合预警大模型，不仅能够多渠道实时展示日、周、月等多维度时段数据监测的动态分析、预警分级和详细报告，实现边坡状态全自动高效判识，还以“智能预警一张图”为数据分析载体清晰揭示边坡隐患关键因素，为灾害的精准辨识提供持续、全面且稳定的监测服务，真正实现了对露天煤矿边坡隐患排查与风险判识全方位、全生命周期管理，为边坡灾害的预防和治理提供了科学依据和有力支撑。





### 三、多场关联监测与预报

#### 系统架构



四维感知

理论支撑

预警指标

预测预警

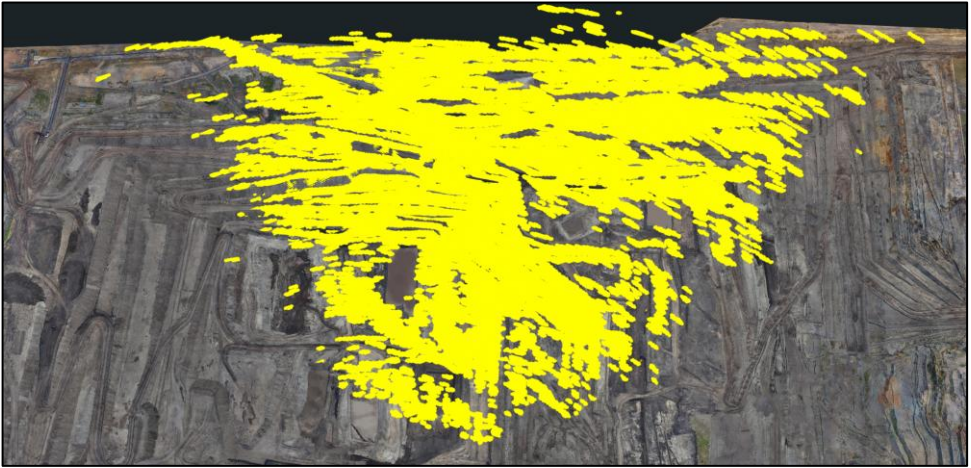
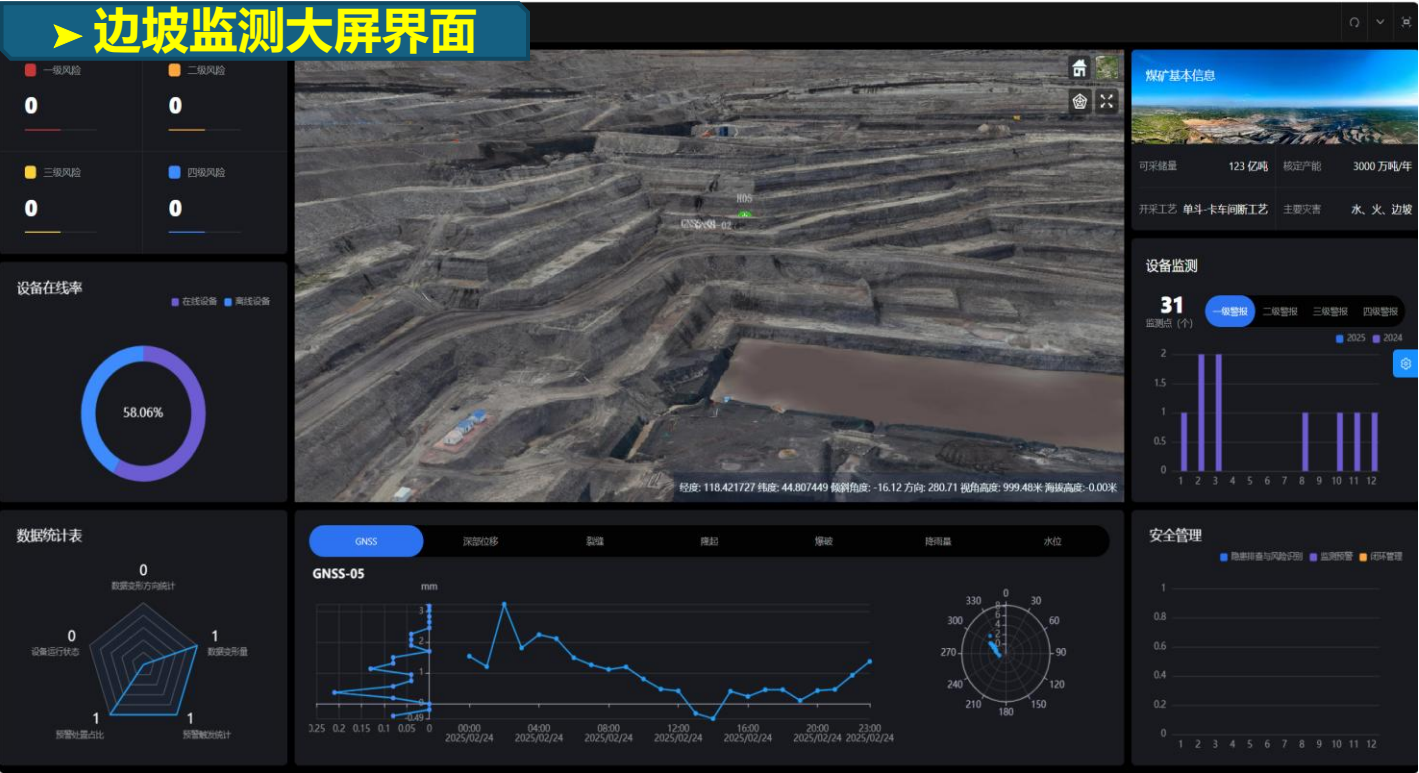
系统综合判断+专家研判

### 三、多场关联监测与预报



#### 数据可视化功能模块

- ▶ **边坡监测大屏界面：** 包含预警信息、设备在线率、数据雷达图、滚动播放实时数据、安全管理闭环统计等信息
- ▶ **雷达数据展示：** 可实现多台雷达数据在三维图上叠加
- ▶ **基础数据展示：** 实现以小时、天、周、月等尺度的数据查询与下载，覆盖GNSS、深部位移、爆破振动、裂缝计、隆起仪、降雨量、地下水、边坡渗水等监测设备





### 三、多场关联监测与预报



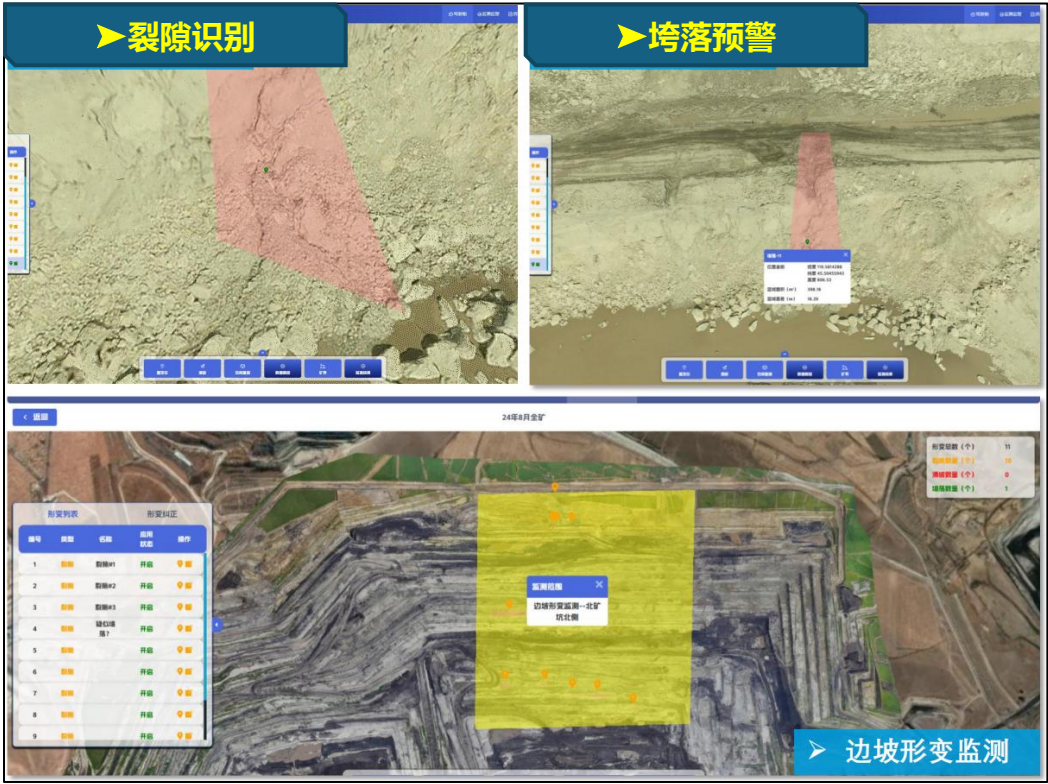
#### 数据融合分析功能模块

- ▶ **剖面数据融合**: 对剖面上的不同监测设备的数据进行融合分析, 分析主要地层位移变化区域
- ▶ **多参数分级预警模型**: 改变以位移为主要指标的趋势判断及预警方法, 确定不同安全失稳阶段的敏感性和差异性
- ▶ **矿坑安全分区**: 根据区域监测数据, 从稳定性系数、位移预警、滑动风险、关注等级等方面对矿坑安全分区综合判断
- ▶ **形变预测**: 根据历史监测数据, 统计数据分布形态, 选取预测模型实现小时形变预测



#### 地质灾害监测功能模块

- ▶ **边坡地质灾害监测**: 包括边坡明显沉降、严重变形、变形加速等情形
- ▶ **区域地形形变监测**: 利用无人机周期采集矿区地表地形数据, 运用空间分析技术分析露天矿全区域地形形变特征, 明确地表沉降、隆起变形区域, 并依批变形类型和变形量等指标进行超限预警。
- ▶ **矿区裂隙发育监测**: 运用AI图像识别技术构建露天边坡和平台裂隙识别模型, 实现露天矿边坡和平台裂隙产生区域, 裂隙长度、宽度精准识别, 与标准值比对。





### 三、多场关联监测与预报



#### 露天矿灾害监测功能模块

##### ▶ 边坡基础监测：

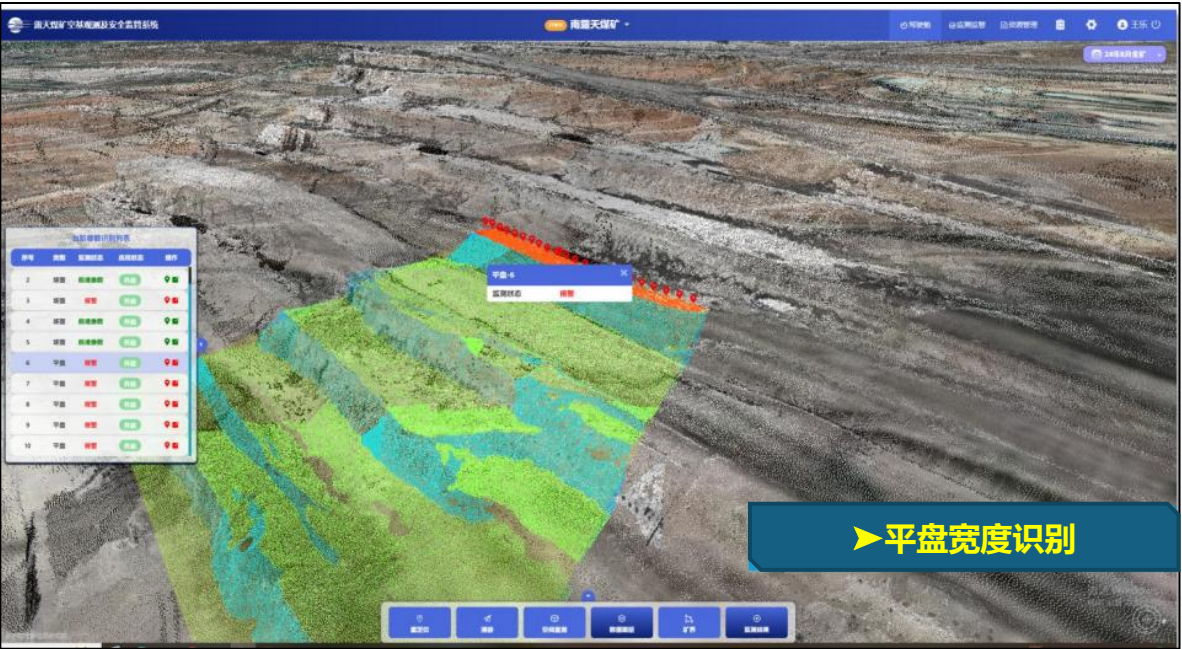
结合矿区高精度点云与三维实景模型数据，利用人工智能算法自动计算识别露天矿台阶的坡体结构，进而判定是否存在安全隐患

台阶高度严重超高、平盘宽度严重不足

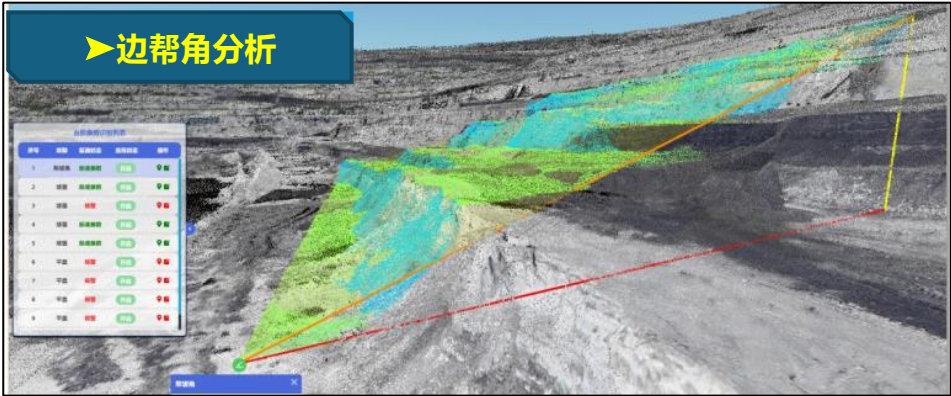
建立台阶参数和平盘宽度数据库，识别单个台阶高度和工作平盘宽度

自动识别计算边帮角，露天煤矿边帮角大于设计最大值进行预警

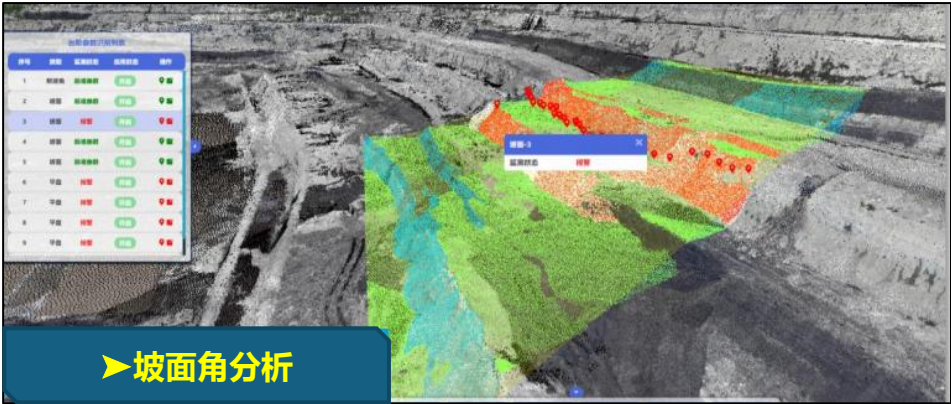
利用无人机巡检高清影像数据，进行人工智能判定，识别明火和冒烟点



##### ▶ 平盘宽度识别



##### ▶ 边帮角分析



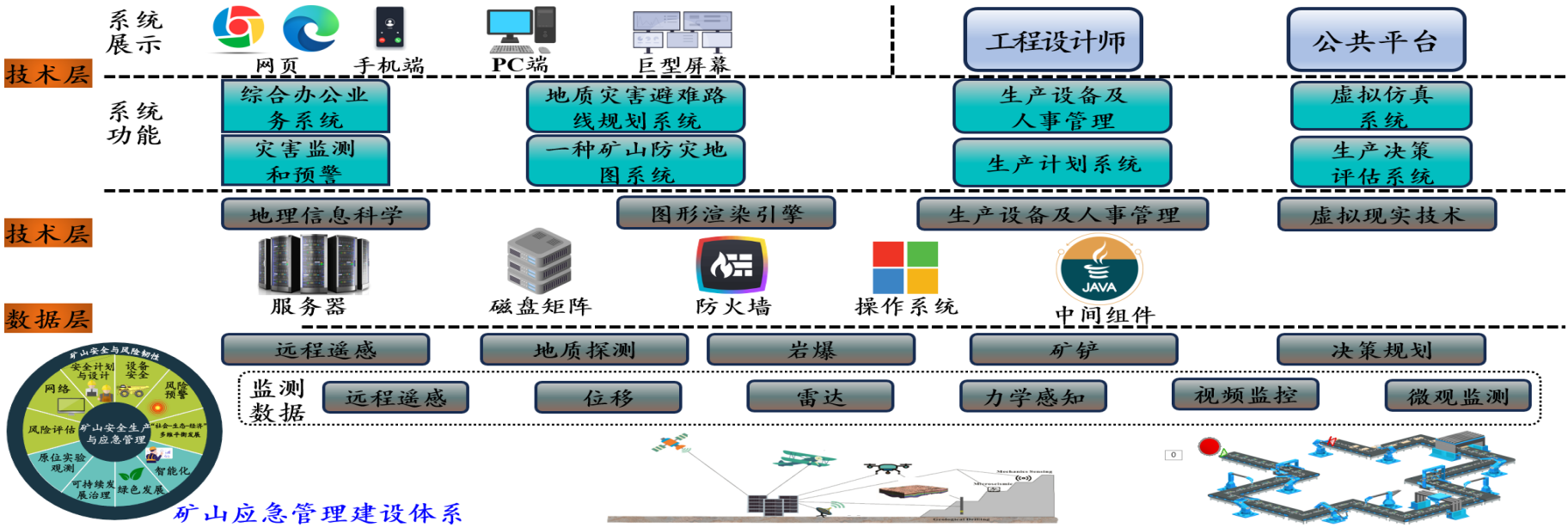
##### ▶ 坡面角分析



##### ▶ 自然发火点识别

“山石”

突破边坡监测装备“卡脖子”问题，打破国际垄断、填补国内空白





### 三、多场关联监测与预报



三维实景扫描



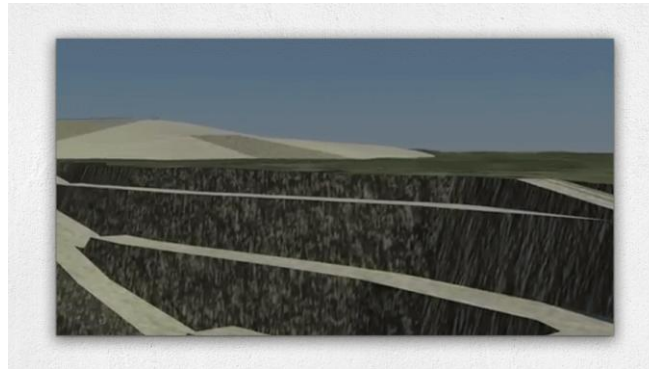
三维实景扫描



人工巡视



无人机巡检



工程实施削帮压脚



工程原位试验



An aerial photograph showing a vast, green, undulating landscape. A multi-lane highway runs diagonally from the bottom right towards the center. In the background, there's a body of water under a sky filled with dramatic, grey clouds. The text "谢谢各位!" is overlaid in the center in a large, white, bold font.

# 谢谢各位!

电话：18241810055（微信同步）