



# 中国煤矿安全智能开采地质保障系统

**彭苏萍 中国工程院院士**

中国矿业大学（北京）

煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室

# 汇报提纲

- 一、实验室简介**
- 二、建设背景及存在问题**
- 三、煤矿安全高效开采地质保障关键技术及装备**
- 四、我国煤矿智能开采地质保障系统**
- 五、结论与展望**

# 第一部分

# 实验室简介

# 1.1 实验室概况



## 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室

2006获批国家重点实验室，是煤炭行业第一个国家重点实验室，2010、2015在**地学领域**评估。2023年重组中从地学领域转移到新建的能源领域。

目标

以国家能源保障和“双碳”目标为导向，聚焦煤炭资源绿色智能开采与洁净高效利用的基础创新，建成国际一流的煤炭资源重大基础研究和人才培养高地

关键科技问题

精准探测

智能开采

生态保护

低碳利用

研究方向

1. 煤炭资源  
勘查与开发  
地质保障

2. 煤炭资源绿  
色智能开采理  
论与技术

3. 煤炭资源开  
发环境保护  
与生态修复

4. 煤炭资源  
洁净高效利  
用方法与技  
术

5. 煤炭资源开  
发重大灾害防  
治理论与技术

# 1.1 实验室概况



## ■ 担当学术要职

- 国家能源委员会委员、国务院学科评议组召集人或成员、公共安全科学技术学会理事长等
- 国际古地理学会副主席、国际能源资源循环合作组织候任主席、国际水害防治委员会副主席、国家摩擦学会副主席、世界煤炭研究联盟主席、国际有机岩石学会主席、4个国际一流期刊主编

## ■ 培养杰出人才

- 工程院院士 1 名，外籍院士 1 名；杰青 4 人、长江 7 人、领军人才 8 人；优青 4 人、青长 2 人、青拔 5 人

## ■ 国际合作交流

- 与哈佛、斯坦福、牛津等大学及劳伦斯-伯克利国家实验室开展合作研究
- 主持四个“学科创新引智基地”项目，吸引国际高端人才合作研究
- 主办了国际有机岩石学等国际大型学术会议20余次

## ■ 行业协同创新

- 与行业10个国家重点实验室建立密切联系，担任实验室学术委员会主任
- 支撑煤炭行业骨干企业的科技创新

# 1.1 实验室概况



## ■ 承担重大项目

- 主持国家重点研发、973、863、科技支撑计划项目等 22 项，国家自然科学基金重点项目 13 项；国家重大科学仪器设备专项 4 项；科研总经费 15 余亿元
- 主持国家重点咨询项目 10 项

## ■ 取得重大成果

- 国家科技进步一等奖 1 项、自然科学二等奖 1 项、发明奖二等奖 5 项、科技进步二等奖 17 项；中国专利金奖 2 项，省部级一等奖 50 余项
- 发表国际高水平论文 2100 余篇；制定国家/行业标准 30 余项、发明专利 1500 余项



## 1.2 学术带头人



实验室主任

**彭苏萍** 中国工程院院士 第九届能源与矿业学部主任



**彭苏萍**

能源系统工程、矿山工程  
地质与工程物探专家

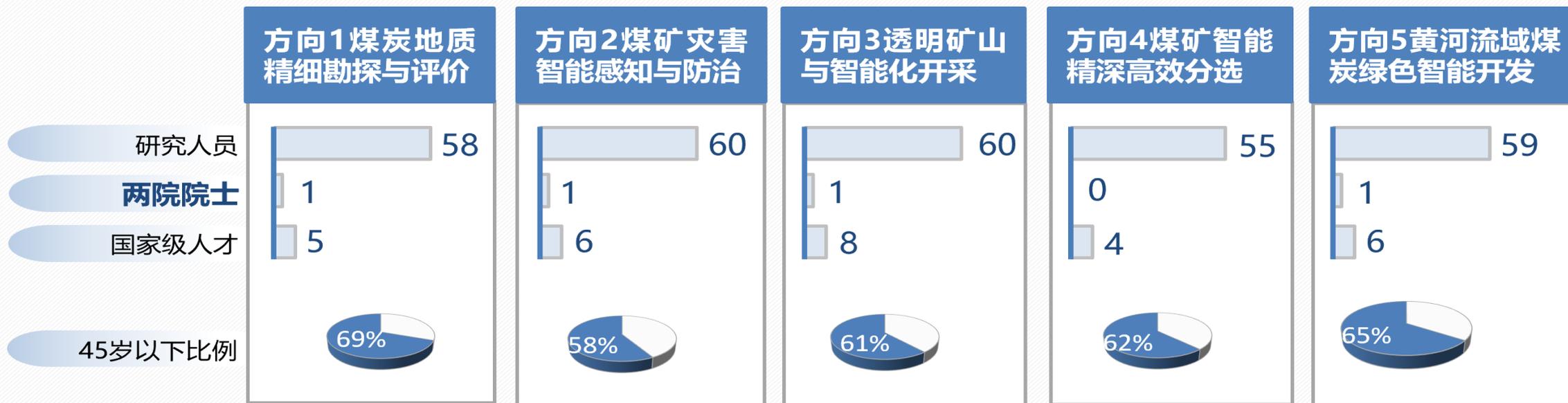
- 国际能源委员会委员
- 国际古地理学会副主席
- 国际能源资源循环合作组织候任主席
- 国家安全生产专家委员会副主任委员
- 中国煤炭学会副理事长
- 公共安全学会（中国）理事长
- 两个国际杂志主编
- 多个行业企业国重学术委员会主任

**曾获国家技术发明二等奖 2 项，国家科技进步二等奖 3 项**

# 1.3 研究队伍



- 研究人员 **292人**， 管理人员 **11人**， 技术人员 **45人**
- 两院院士 **4人**， 国家级人才 **29人**， 正高级职称 **173人** (占**49.71%**)
- 45岁及以下 **224人** (占**64.37%**)

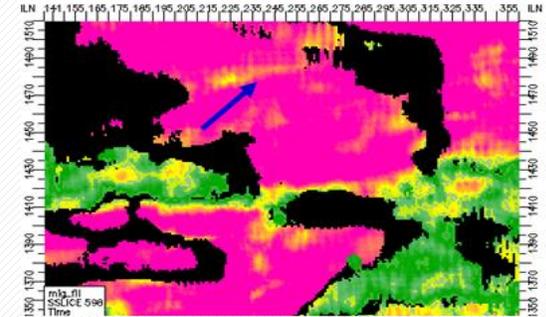


## 1.4 实验室成果



### 在煤炭开发领域取得了5大标志性成果

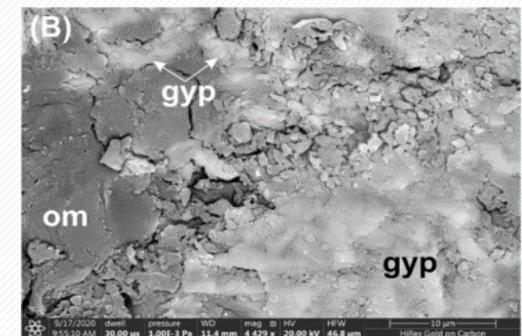
**成果一：**创立了地质结构与灾害源精细探测理论与技术体系，为我国煤炭安全高效开采提供了地质保障理论与关键技术支撑



**成果二：**创建了绿色智能开采理论与技术体系，推动了我国煤炭开采技术变革，处于世界领先水平



**成果三：**提出了煤中微量元素富集机理及资源化利用方法，发现了超大型煤田中关键战略金属赋存



## 1.4 实验室成果



### 在煤炭开发领域取得了5大标志性成果

**成果四：**建立了矿区开发与生态环境相协调的理论体系，提出了煤矿区微生物复垦技术，为黄河流域矿区生态治理提供了技术典范



**成果五：**构建了煤矿重大动力灾害智能预警防治理论与技术，在我国及加拿大、波兰、孟加拉国等13个国家推广应用，支撑煤矿安全生产水平显著提高



## 1.5 国内外交流



建立开放包容常态化国际学术交流制度，围绕“一带一路”需求推进国际合作，与美国劳伦斯伯克利国家实验室、斯坦福大学、麻省理工学院、英国帝国理工大学、爱丁堡大学，法国巴黎矿业学院、澳大利亚昆士兰大学、加拿大卡尔加里大学、哈萨克斯坦国立研究技术大学、奥地利莱奥本矿业大学等30多个世界一流大学和科研院所建立合作伙伴关系。



## 第二部分

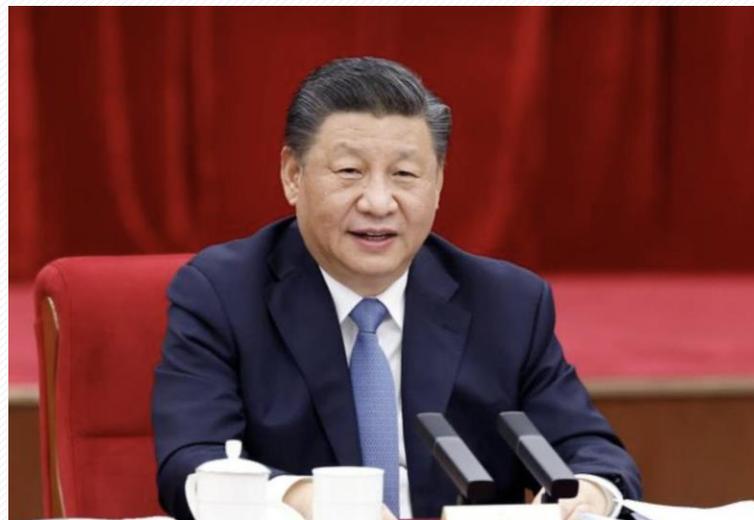
# 建设背景及存在问题



**习近平总书记指出“我国资源特色是煤，……，在相当长一段时间内，甚至从长远来讲，还是以煤为主的格局…”，“煤炭能源发展要转型升级，走绿色低碳发展的道路”。**



习近平总书记在陕西榆林考察调研时做重要指示



习近平总书记在2022年全国两会上发表重要讲话

## 2 建设背景及存在问题



- 20世纪80年代以前，我国煤炭生产以“炮采”和“普采”为主，开采效率低，对地质工作的要求很低。
- 20世纪80年代后，我国开始**综合机械化生产技术**，难度很大。其中最大的问题是**开采地质条件复杂**，影响了机械化效益。



炮采



综采

## 2 建设背景及存在问题



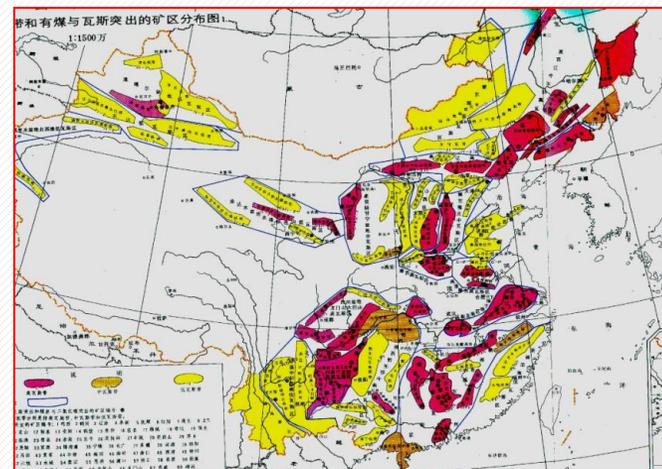
- 20世纪80年代末、90年代初，学者们开始利用**矿井工程地质勘查技术**研究解决我国煤田地质构造复杂、煤层厚度变化大与机械化开采不相适应等问题，并在原先煤田地质学基础上建立起矿井工程地质学。
- 同时，科技人员也在研究利用**矿井地球物理勘查技术**解决矿井地质结构的精细描述和探测问题，使矿井地质预测精度大大提高。



传统地质工作方法无法满足现代矿井需求



机械化综采工作



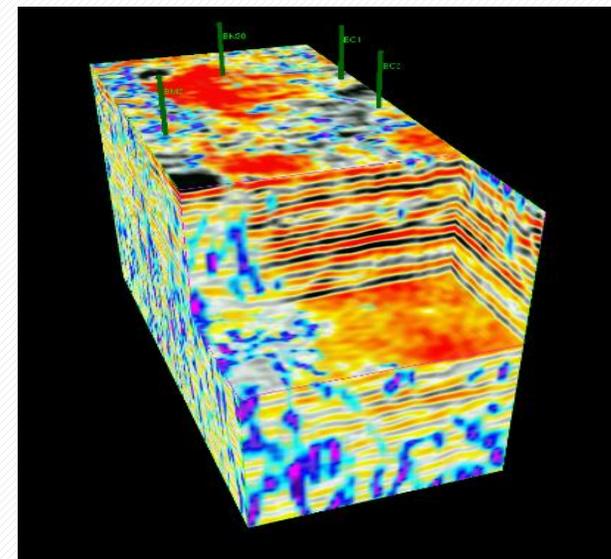
46%煤矿为地质条件复杂或极为复杂矿井

## 2 建设背景及存在问题



□ 20世纪90年代至今，**煤矿高分辨三维地震勘探**等物探技术的发展促进了**煤矿安全高效矿井地质保障系统建设走向成熟**。

- 物探技术在识别矿井精细地质构造表现出独特的优势。
- 在精确描述煤矿复杂地质构造、预测煤矿灾害隐患方面的准确性大幅度提高。
- 在识别煤矿顶底板岩性和煤与瓦斯、矿井突水灾害隐患技术方面日臻完善。
- 使矿井地质预测从点上升到采区-矿区范围，促进了矿井地质工作概念的根本改变。



三维地震数据体

**促使我国煤矿机械化生产的开机率从不到40%提高到90%以上，煤矿生产安全根本性好转，推动了我国煤炭工业的技术升级和发展。**

## 2 建设背景及存在问题



### □ 煤炭智能化/少人化开采、矿井地质透明化是煤矿安全高效矿井地质保障系统发展的努力方向。

- 年产千万吨的现代化生产矿井成为主力军，特别是2014年陕煤集团黄陵矿业一号煤矿1001工作面首次实现智能化开采，少人化、无人化、智能化深入人心。
- 《能源技术革命创新行动计划（2016—2030年）》提出，到2030年实现煤炭智能化开采，完成工作面透明化、智能化；2020年2月，国家发改委等八部委联合发布了《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》，指明**煤矿智能化地质保障**的研究方向。
- 煤炭**绿色开采**、**智能精准开采**等对煤矿安全高效开采地质保障系统提出了新的更高的要求。

**必须清醒认识到：目前智能开采工作面多是在我国煤田地质条件相对简单的矿区，其内涵被强大的机械化能力所掩盖。**

## 2 建设背景及存在问题



### ➤ 目前主要科学和技术难题

□ 勘探精度问题和地质物探数据融合问题是阻碍建立真正意义上的透明工作面的主要问题之一

- ① 大部分生产矿井基于钻探资料,在有的矿区包含了三维地震勘探成果所建立起的煤矿三维地质模型,只是不同数据体的人工叠加,没有做到真正意义上的数据融合;
- ② 缺少地质物探联合的高精度三维地质模型以及岩性、物性模型;模型的动态更新一直是一个长期存在问题;
- ③ 不同精度、不同数据结构的数据体叠加在一起,在精度、分辨率上并没有真正提高,就如同“毛玻璃”一般,还不是真正意义上的三维;
- ④ 现在提交的三维地质数据体和矿井生产工程设计还不能融合在一起,存在“两张皮”的现象。

## 2 建设背景及存在问题



### ➤ 目前主要科学和技术难题

□ **煤岩层位智能探测**问题是制约智能化采煤装备的重大难题之一

- ① 三维地震勘探建立的煤矿三维地质体，精度低（3m），并不是真正意义上的透明工作面，**难以满足远程无人化操控的“厘米级”精度需求。**
- ② 煤岩分界难题仍是制约煤矿智能化开采的瓶颈问题。从上世纪90年代出现的视频监控、光谱检测、X射线等方法因**探测深度和精度不足**而告停止。
- ③ 地质雷达是煤岩界面分辨最具潜力的仪器装备，但是**受制于能量衰减问题，雷达天线要贴着煤壁，探测不能与采煤机联动**，因此该技术也难于推广。



## 第三部分

# 煤矿安全高效开采地质 保障关键技术及装备



## □ 5大创新成果

### (1) 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术

**三维地震——地质构造探测精度从30m提高到3m**

**地震+VSP/测井——探测精度从3m提高到0.5m**

### (2) 矿井本安型防爆地质雷达探测装备与技术

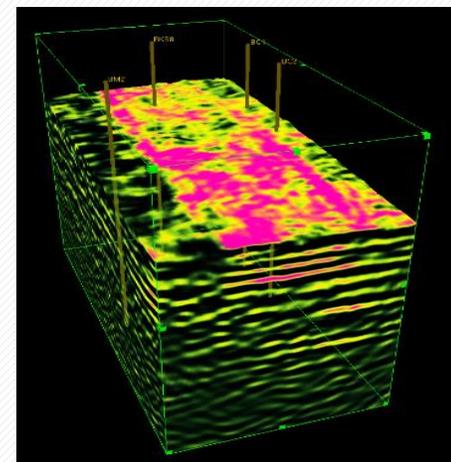
**探测精度从0.5m提高到0.1m**

### (3) 定向钻孔地质雷达探测装备与技术

**煤层厚度、走向以及超前地质异常体透明化探测**

### (4) 矿井地质安全保障技术及智能开采管控平台

### (5) 大型矿井地球物理模型



三维地震数据体



PSP地球物理软件平台

## 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术



### ➤ 现状

- (1) 由于煤矿开采地质条件，特别是小尺度不连续非均质地质体探测查明不清，造成设计和开采方法选择困难，煤炭资源回收率低。
- (2) 地震数据高保真去噪、静校正、偏移归位成像等是高分辨率地震探测技术的关键。
- (3) 勘探精度是建立真正意义上矿井地质安全保障技术及智能开采管控平台的主要课题之一。

### ➤ 主攻目标

- 重点突破煤田复杂地表、复杂地下构造条件下精细高分辨率成像和反演技术，为煤矿高效智能开采提供地质保障。

### ➤ 技术难点和关键点

- 如何提高高保真去噪、静校正、偏移归位成像算法和技术。
- 研发绕射波对小尺度不连续非均质地质体成像技术。
- 研发煤层高精度地震叠前反演技术。

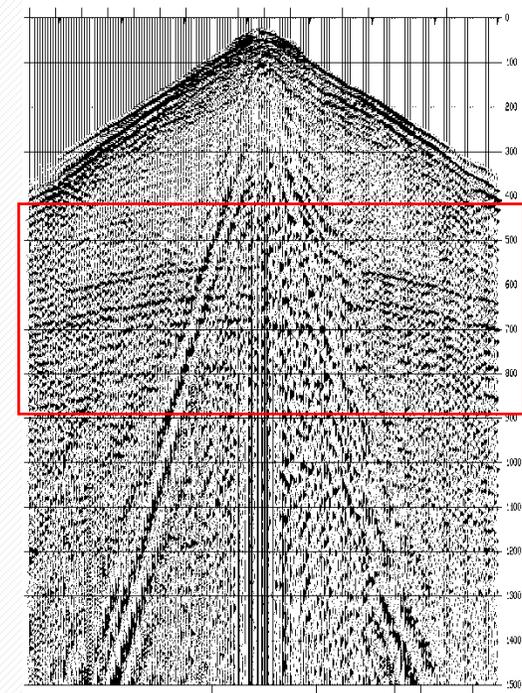
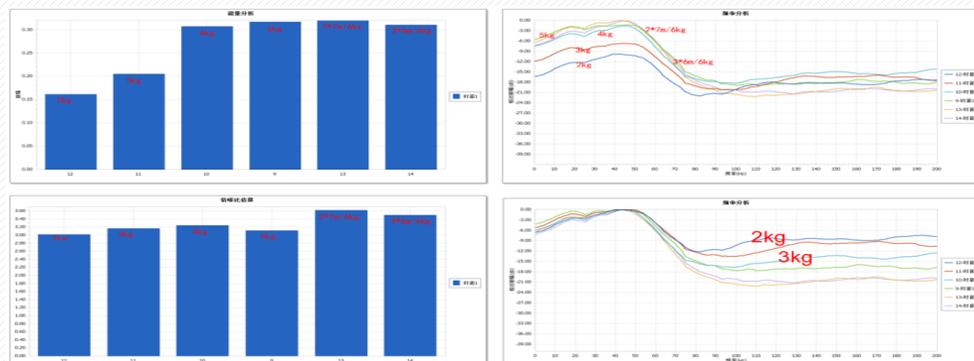
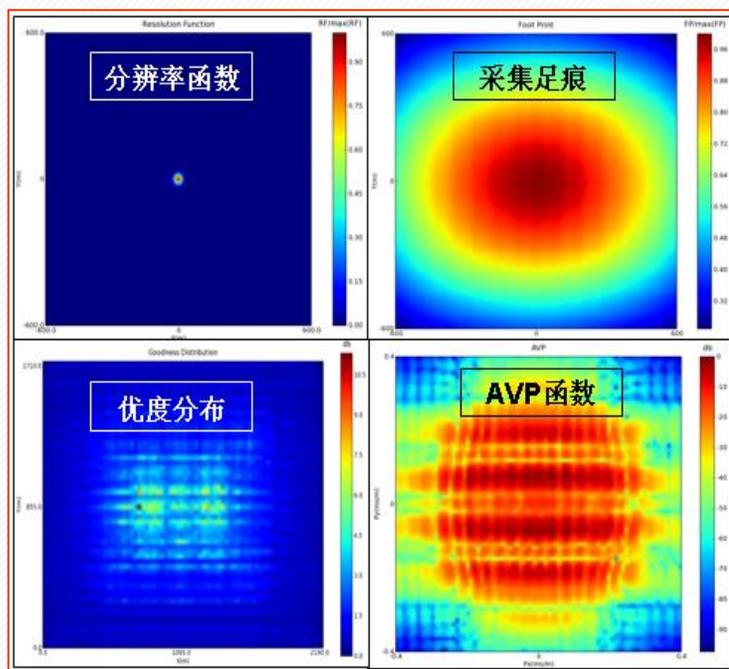
# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术



## (1) 煤矿采区高分辨率三维地震勘探技术

### 以聚焦分析技术为基础的地震野外数据采集技术

利用**聚焦分析**技术开发了三维地震探测数据采集与评价软件，在淮南顾桥矿实施了井地联合三维三分量数据采集，采集到800-1200m深煤系地层品质良好的三维地震数据。



自主研发地震野外采集评价方法

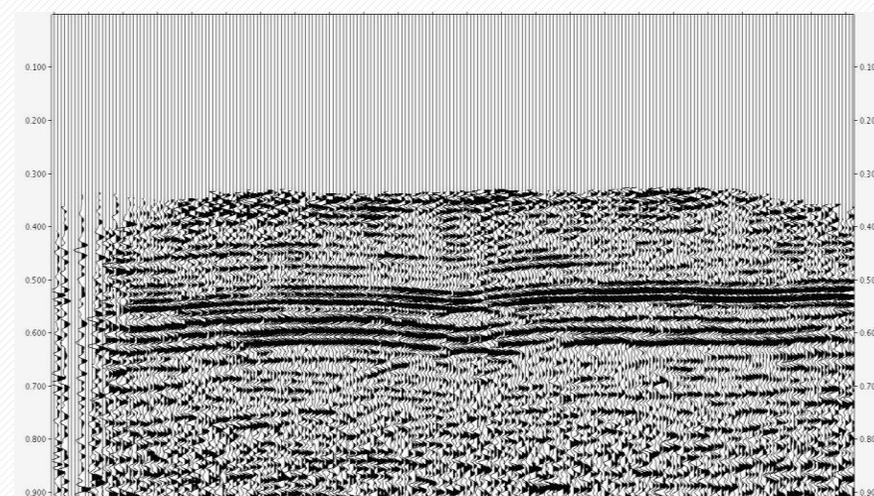
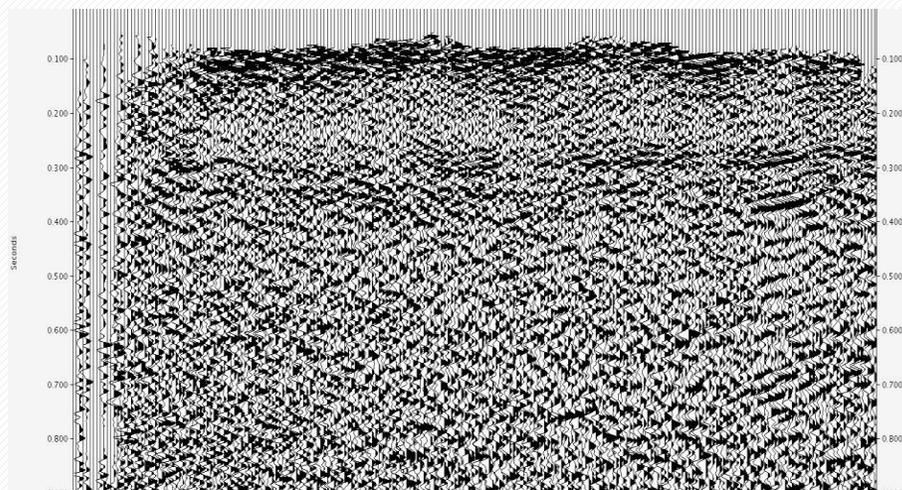
# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术



## (1) 煤矿采区高分辨率三维地震勘探技术

### □ 虚共炮点射线追踪动态静校正方法

针对地表高差大、近地表结构复杂特点，研究了虚共炮点射线追踪动态静校正方法，有效消除了起伏地表和复杂表层结构对地震资料的影响。



静校正前后叠加剖面对比

煤层反射波连续性大幅提高

# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术

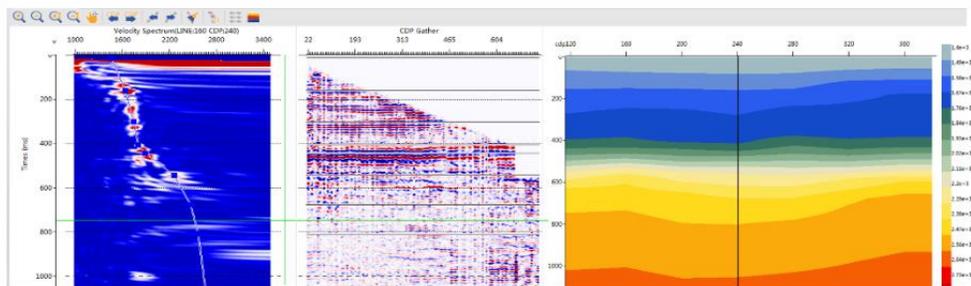


## (1) 煤矿采区高分辨率三维地震勘探技术

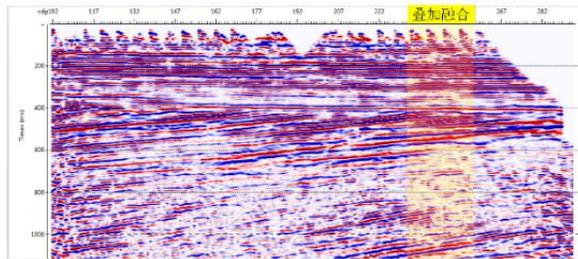
3D复杂构造精细处理

3D连片处理

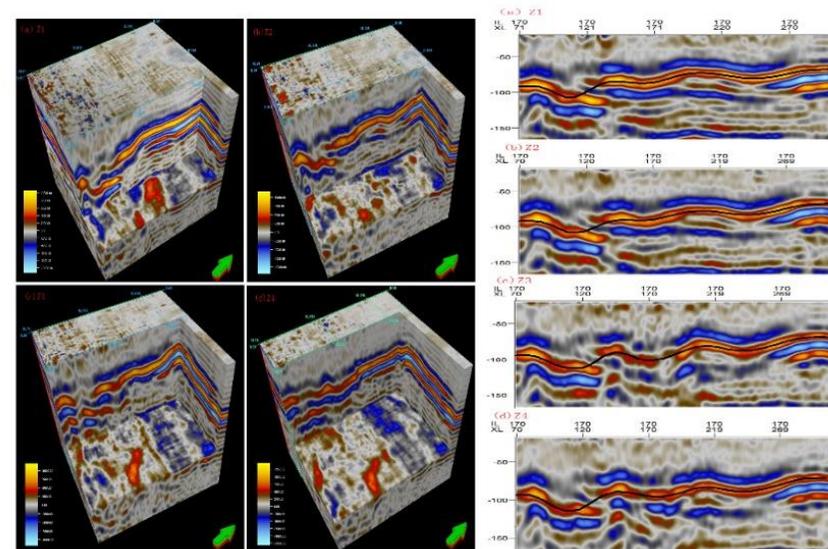
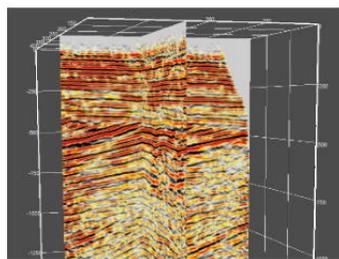
4D地震监测



精细速度分析



复杂3D成像



4D时移地震三维立体显示

4D时移地震二维剖面显示

解决煤田3D复杂构造处理的速度建模和偏移成像问题；实现煤矿地下结构的4D演化地震勘探研究。

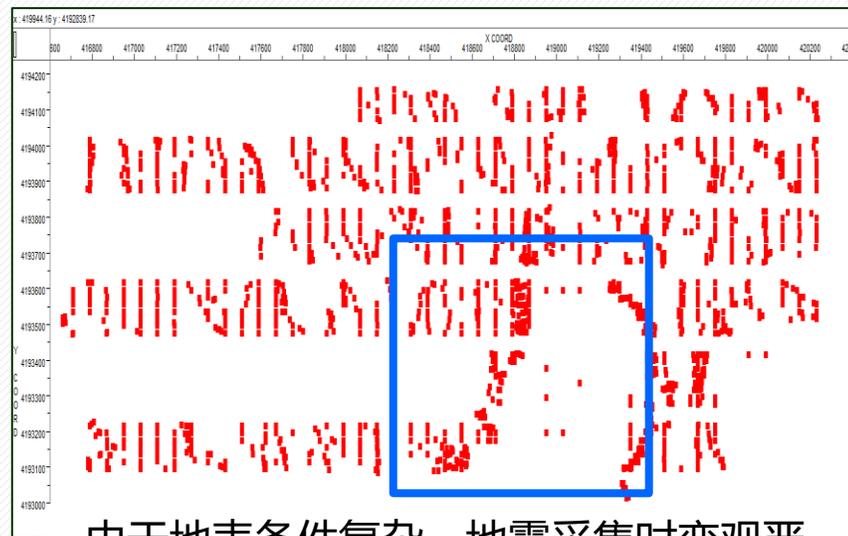
# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术



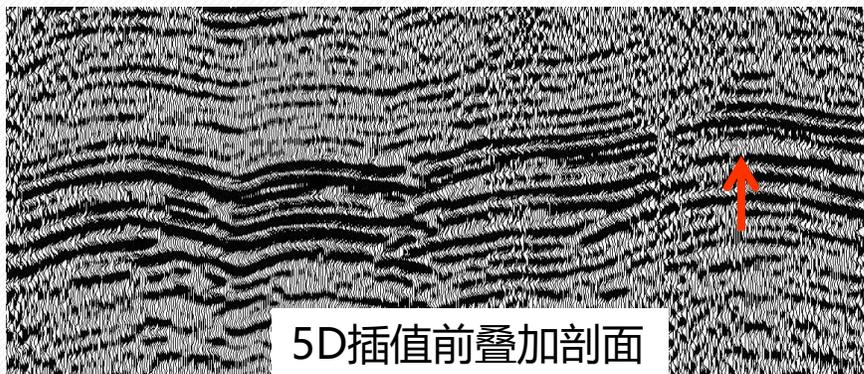
## (1) 煤矿采区高分辨率三维地震勘探技术

### □ 5D地震数据重建

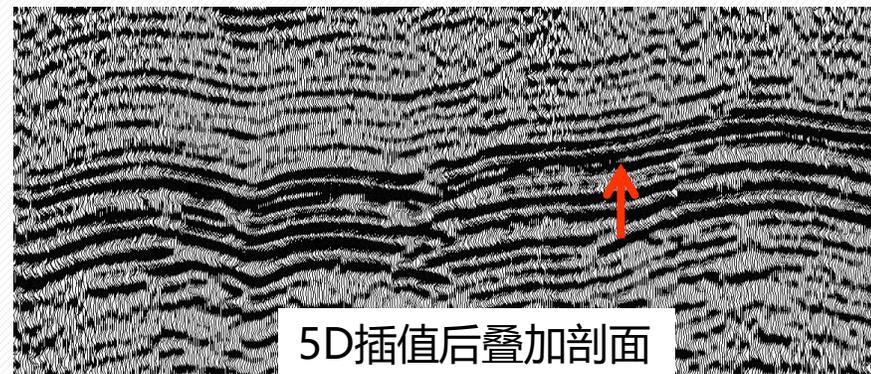
煤矿地表条件复杂，导致地震采集系统不规则，“开天窗”现象较多，影响成像质量。5D地震数据重建准确预测缺失数据的振幅和相位变化，提高同相轴连续性，为高保真叠前偏移地震数据提供一个全采样的规则数据体。



由于地表条件复杂，地震采集时变观严重，蓝色方框内数据大量缺失



5D插值前叠加剖面



5D插值后叠加剖面

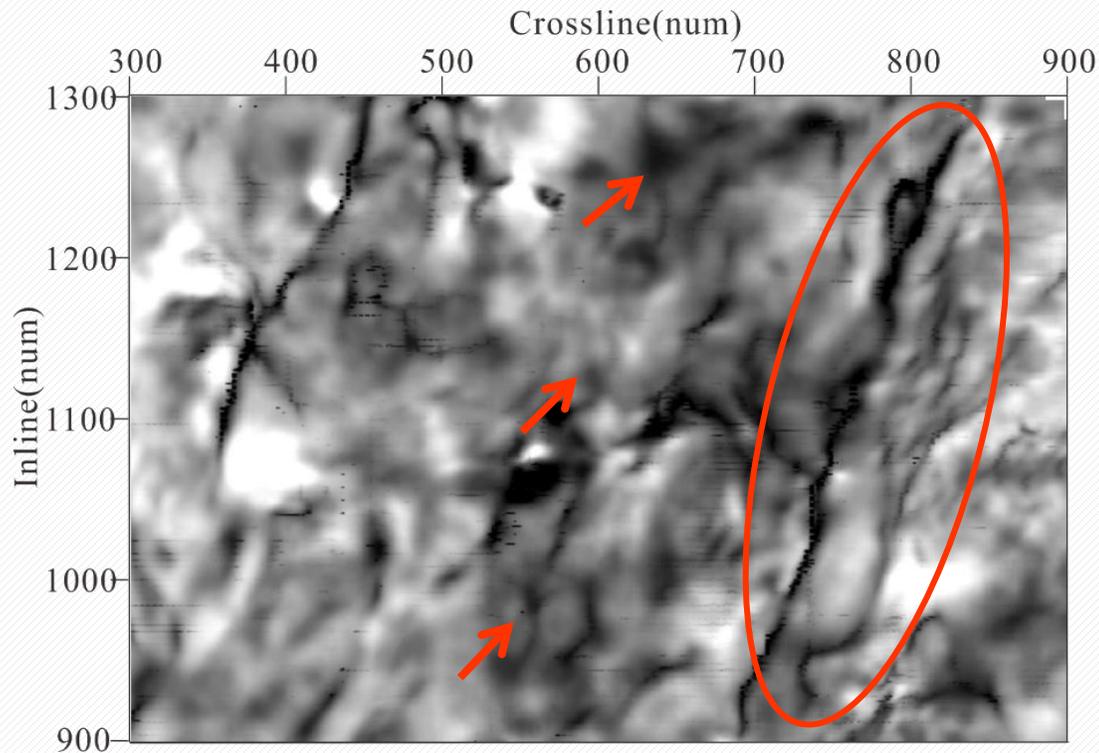
# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术



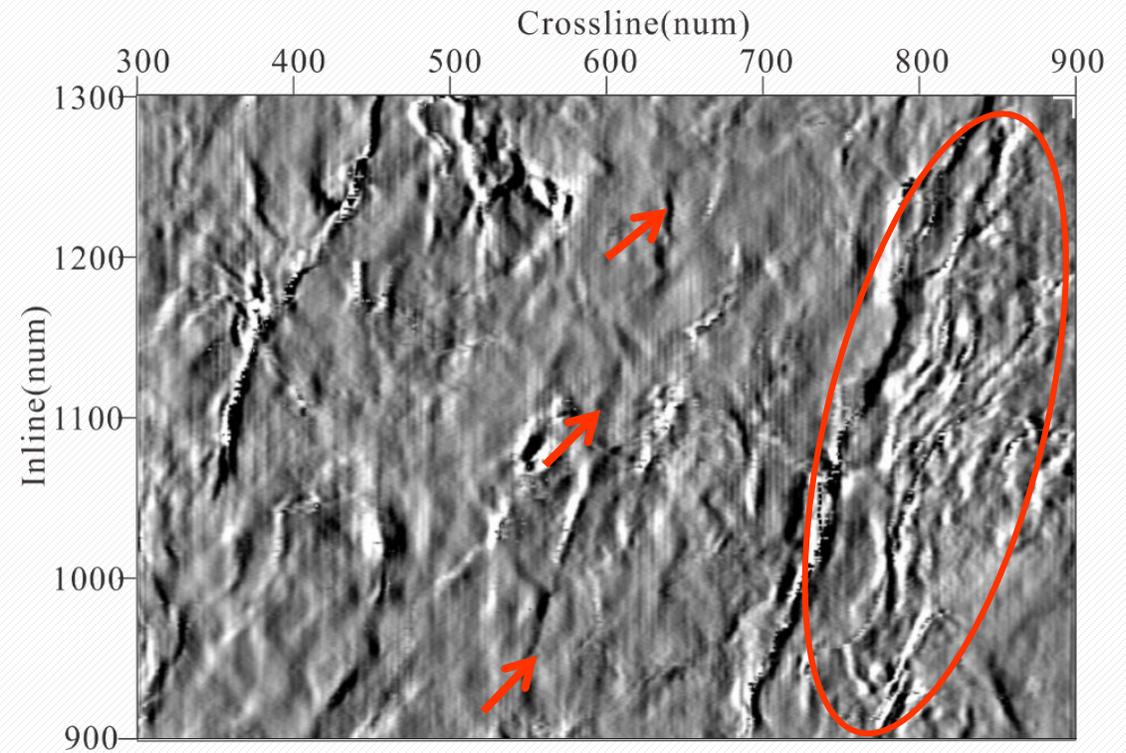
## (1) 煤矿采区高分辨率三维地震勘探技术

□ 开发出146个处理模块组成的煤田地震数据处理系统 (EMS+PSP)

应用**三维叠前绕射波高分辨率成像**技术，探测小尺度隐蔽构造，揭示更为丰富的高分辨地质信息。



三维常规叠前成像方法 (阳煤)



三维叠前绕射波高分辨率成像方法 (阳煤)

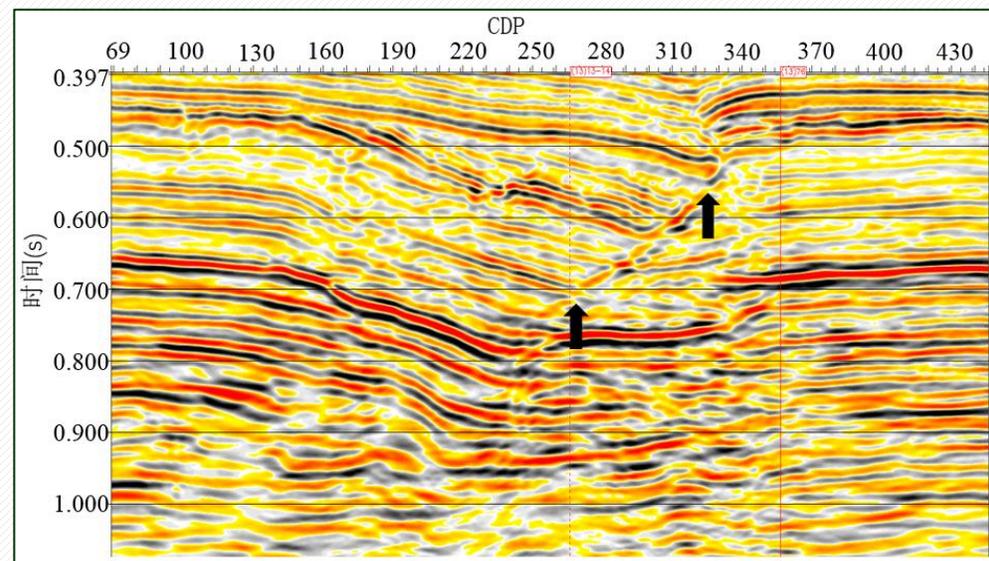
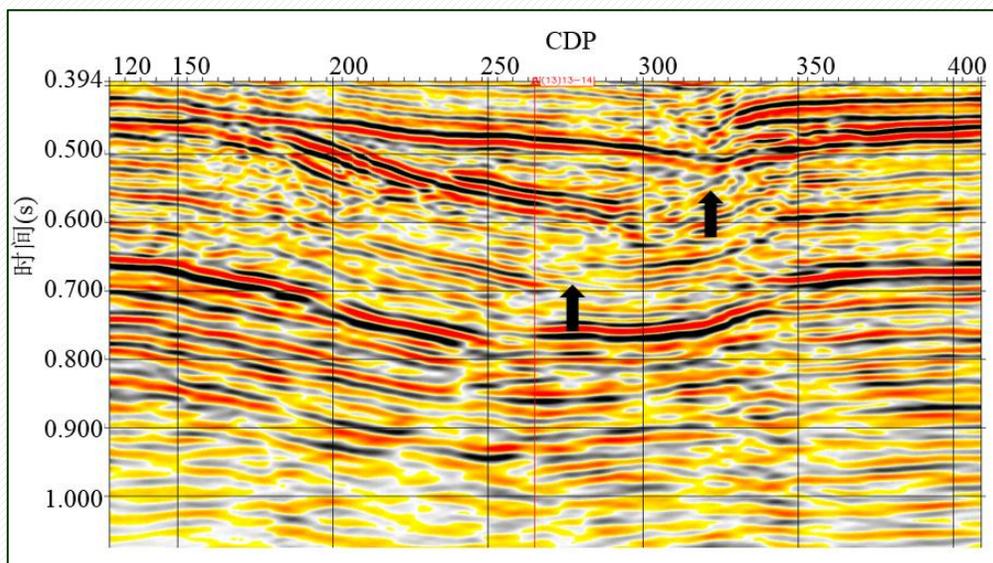
# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术



## (1) 煤矿采区高分辨率三维地震勘探技术

### □ 高分辨率三维连片叠前偏移成像技术

在五维地震数据重建、连片处理等技术基础上，对地震数据进行三维连片叠前时间偏移，实现煤层构造的高分辨率成像。



(a) 处理前

(b) 处理后

三维连片叠前偏移处理前后地震剖面

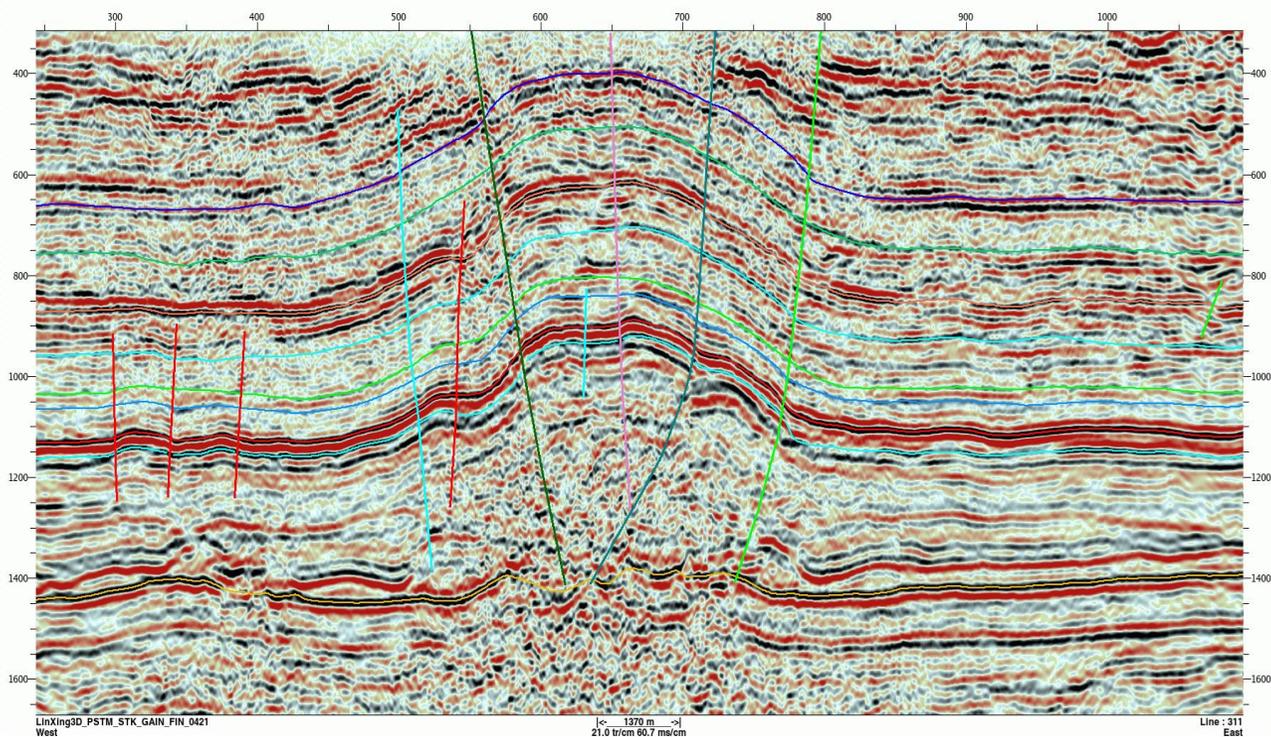
# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术



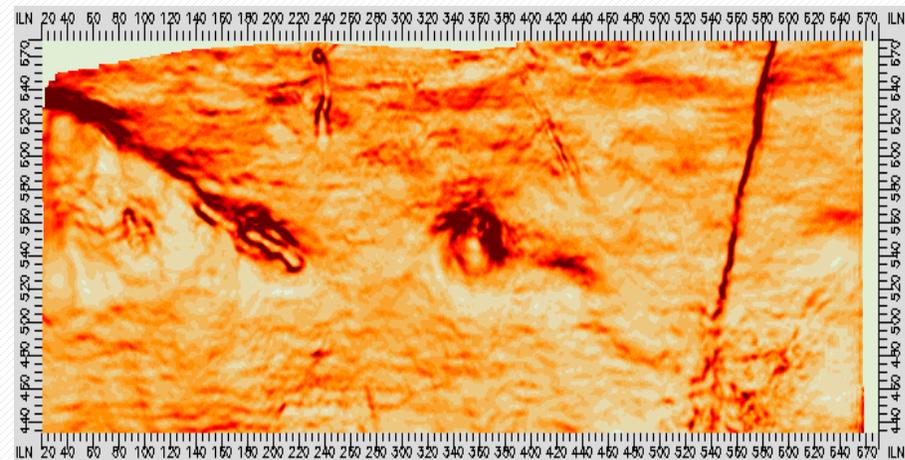
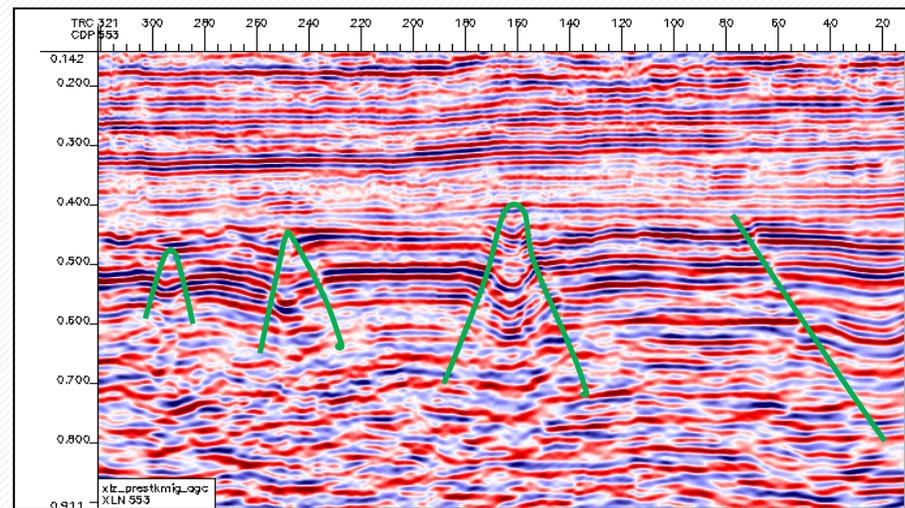
## (1) 煤矿采区高分辨率三维地震勘探技术

### 煤矿采区地质构造高分辨处理成像技术

实现小断层、陷落柱及瓦斯突出部位精确成像，识别煤岩和顶底板岩性。



复杂地质构造(山西临兴)



串珠型陷落柱(谢桥)

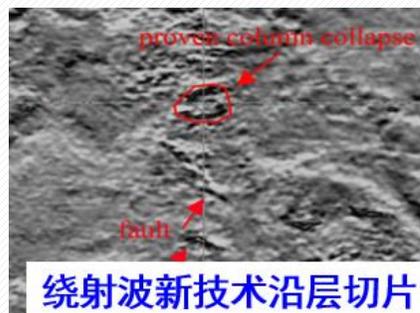
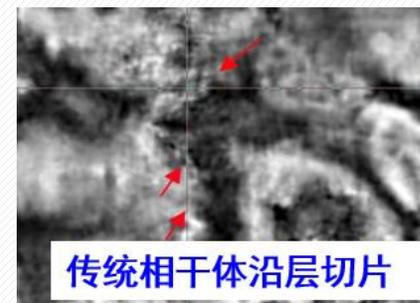
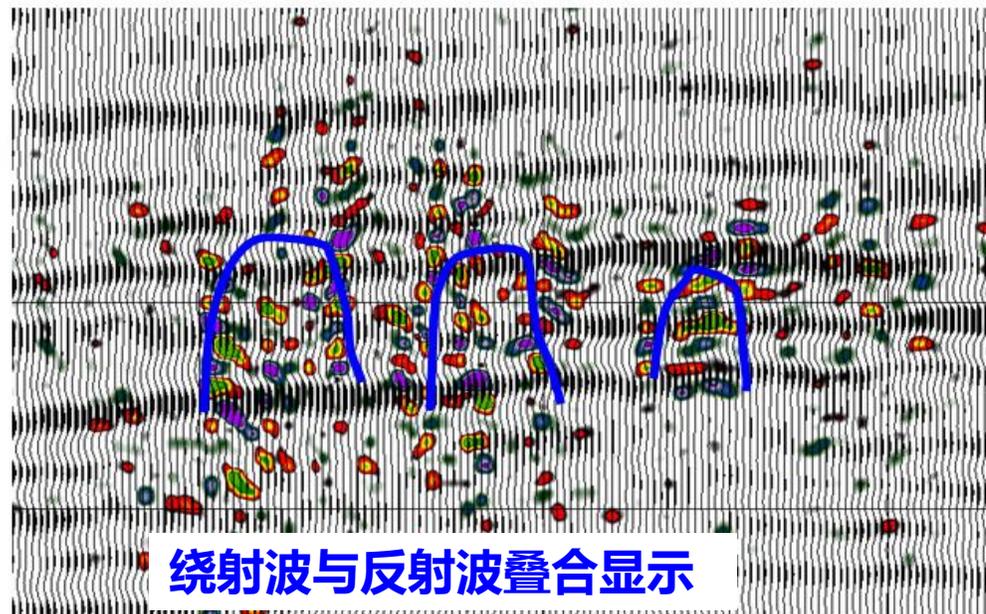
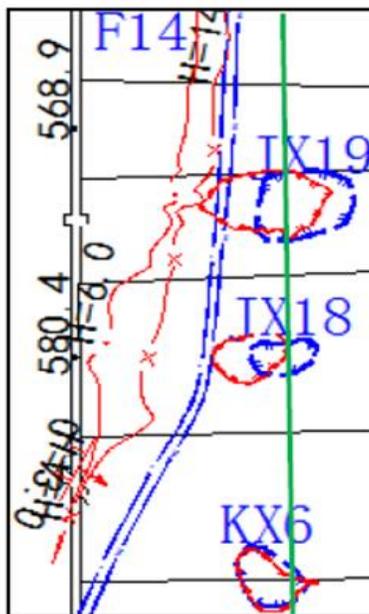
# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术



## (1) 煤矿采区高分辨率三维地震勘探技术

### □ 矿井三维叠前绕射波特色成像技术

打破现有仅限于剖面的绕射波分离技术，同时解决了三维叠前绕射波完整性分离和高分辨率成像难题，达到工业级处理能力，**精准定位小型陷落柱、断裂等隐蔽致灾地质体。**



小回沟煤矿首采区陷落柱识别

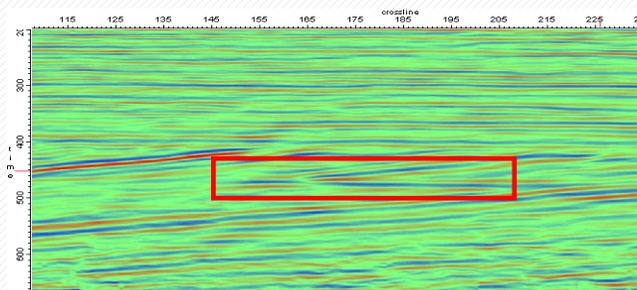
# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术



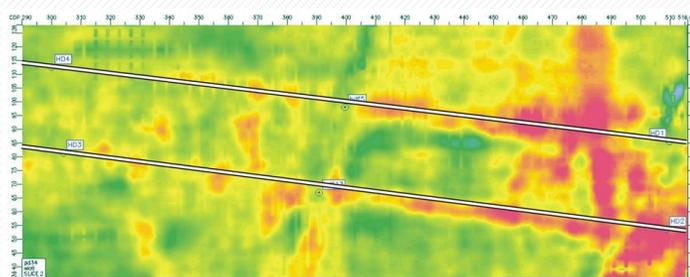
## (1) 煤矿采区高分辨率三维地震勘探技术

### □ 三维地震精细地质构造解释技术

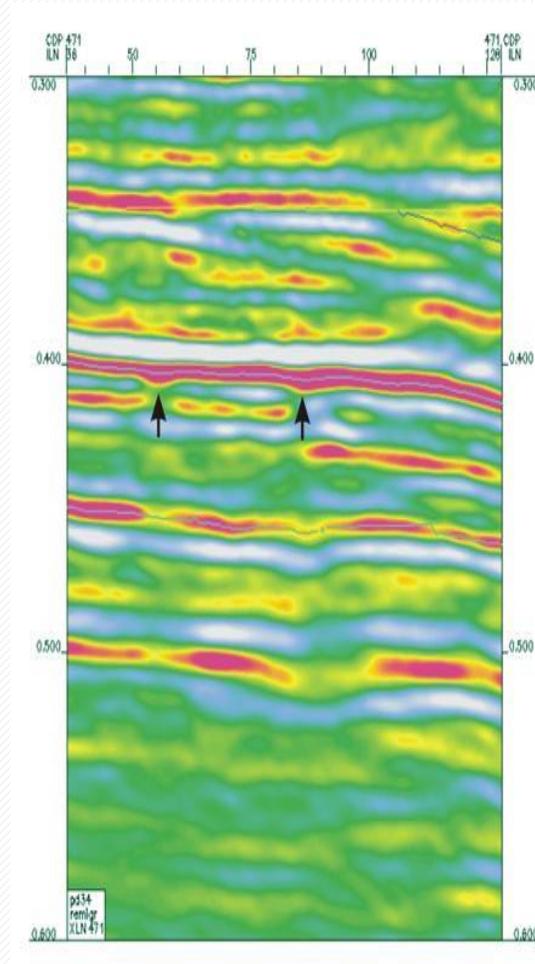
准确探测出深度 $\geq 500\text{m}$ 的 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 的煤矿巷道。



3m×3m巷道在时间剖面上显示

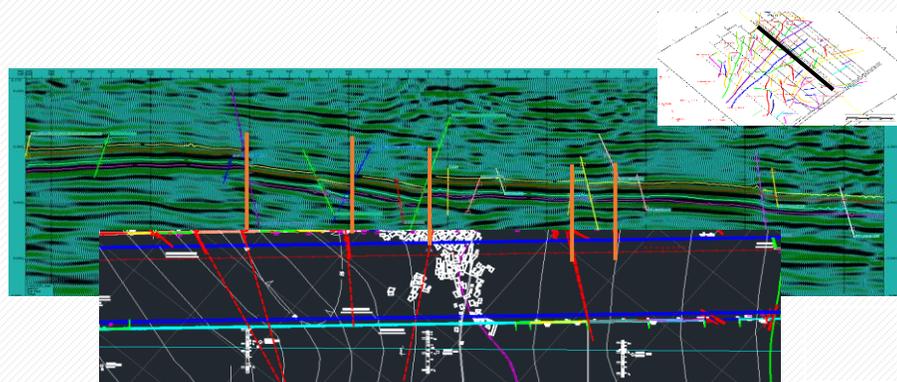


在沿层振幅切上表现为强振幅



巷道剖面显示

煤田第一块岩溶喀斯特地貌条件的三维地震勘探，构造验证率70%。



云南滇东

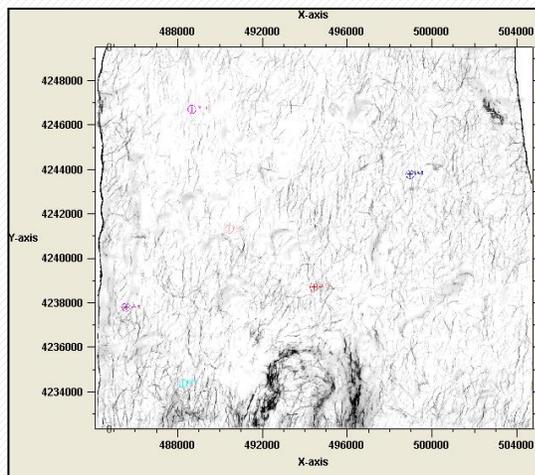
# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术



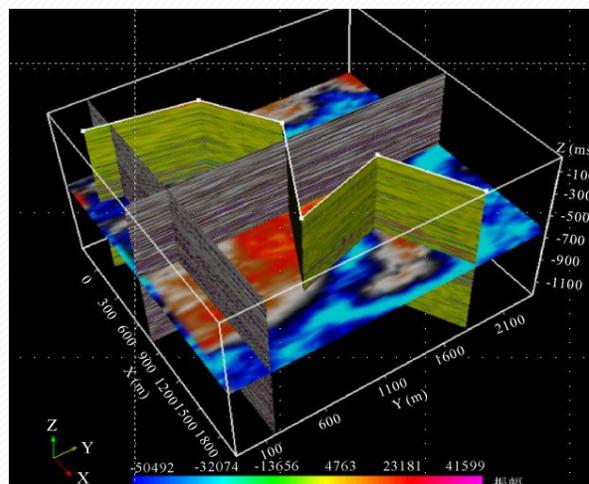
## (1) 煤矿采区高分辨率三维地震勘探技术

### 地震全三维可视化解释技术

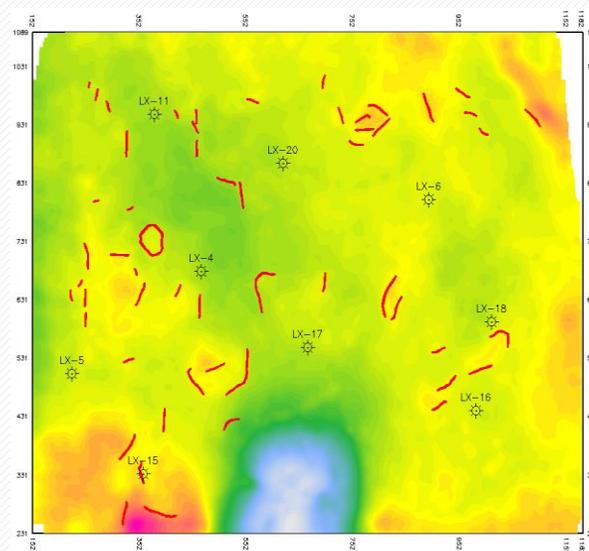
利用地震属性技术，结合人工智能精细识别小断层，同时利用煤矿小构造地震响应特征，建立了精细构造识别的数学模型和分析评估方法，在东部煤矿区可识别埋深1000m、断距3-5m小断层，在中西部山西、陕西一带也可识别断距5m左右断层。



三维地震属性切片



三维地震动态解释



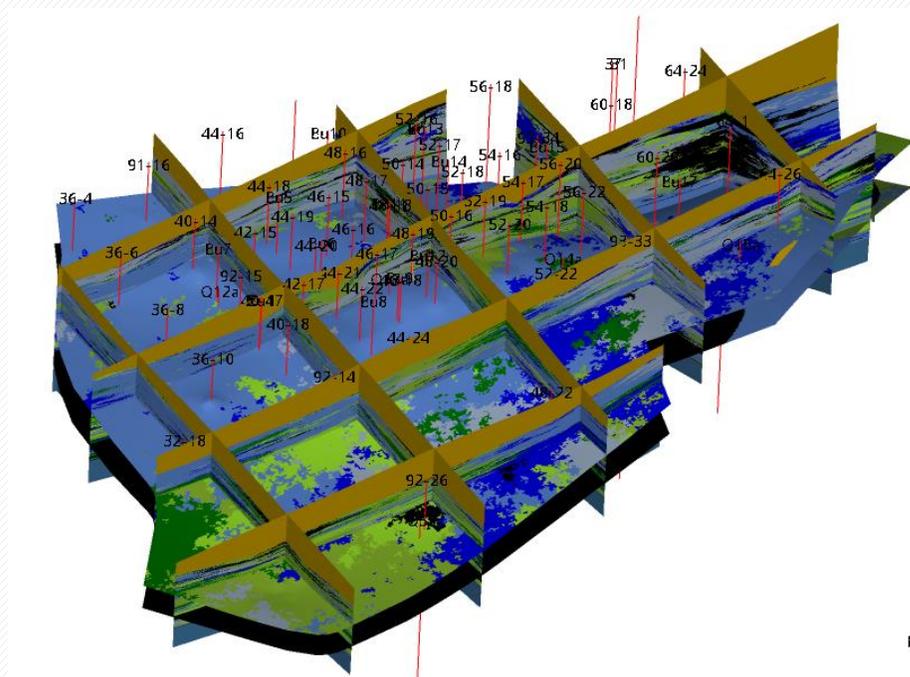
小断层地质解释

# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术

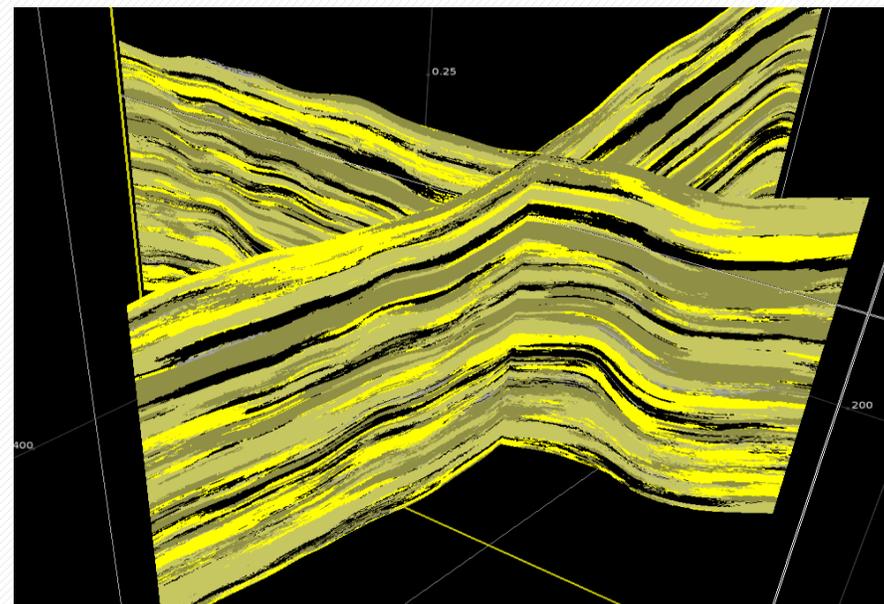


## (2) 基于地震反演的煤岩层精准预测技术

### □ 高精度煤系地层岩性反演技术



含隔水层数据体



煤岩层数据体

**目标：**以波阻抗稀疏脉冲反演成果和地震数据作为协变量进行随机协模拟反演，随机反演岩性及波阻抗数据体，从而预测煤层及砂岩层的空间分布。

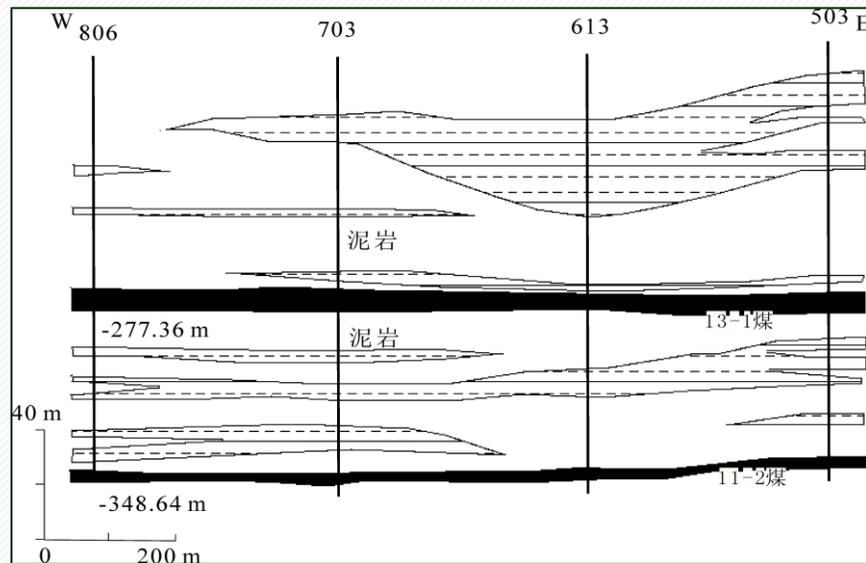
# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术



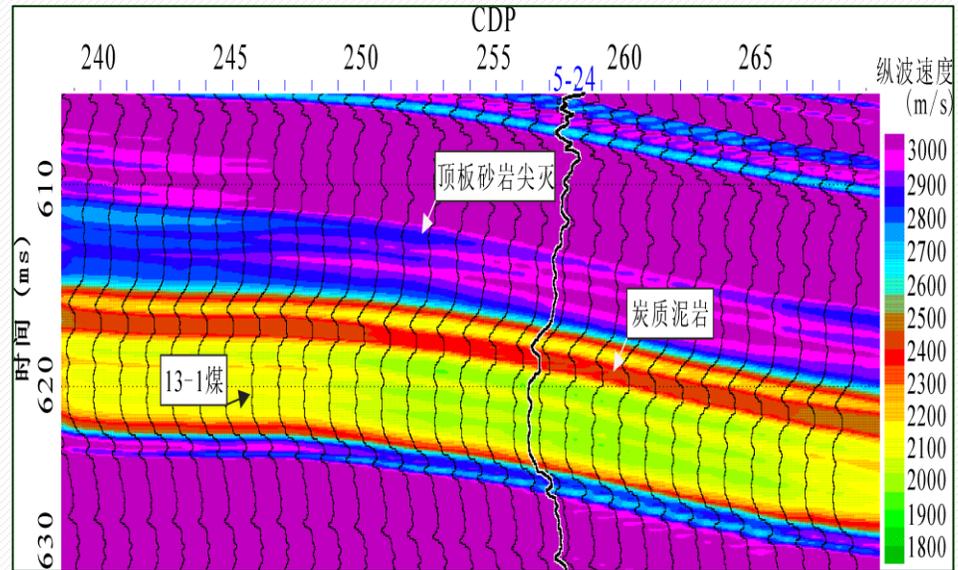
## (2) 基于地震反演的煤岩层精准预测技术

### □ 煤层顶板岩性综合反演解释技术

基于钻孔测井曲线和三维地震勘探，建立了煤层顶板岩性综合反演解释技术，准确预测出老顶砂岩的变薄尖灭带、冲刷带和复合顶板分布区，实现了对**煤矿顶板冒落区**的精确预测。



钻孔预测顶板变薄尖灭区



测井约束反演预测顶板变薄尖灭

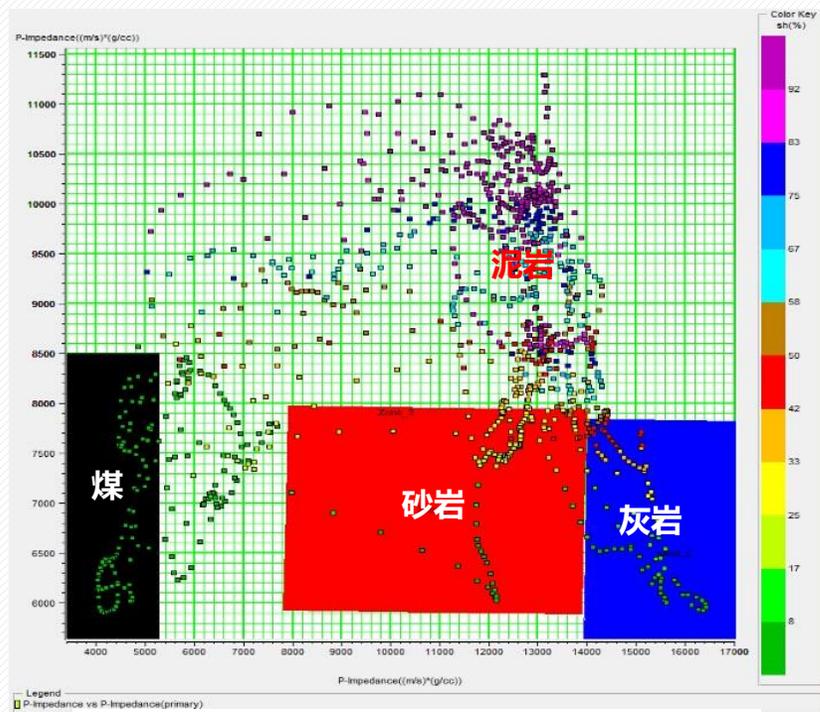
煤层顶板变薄尖灭预测

# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术

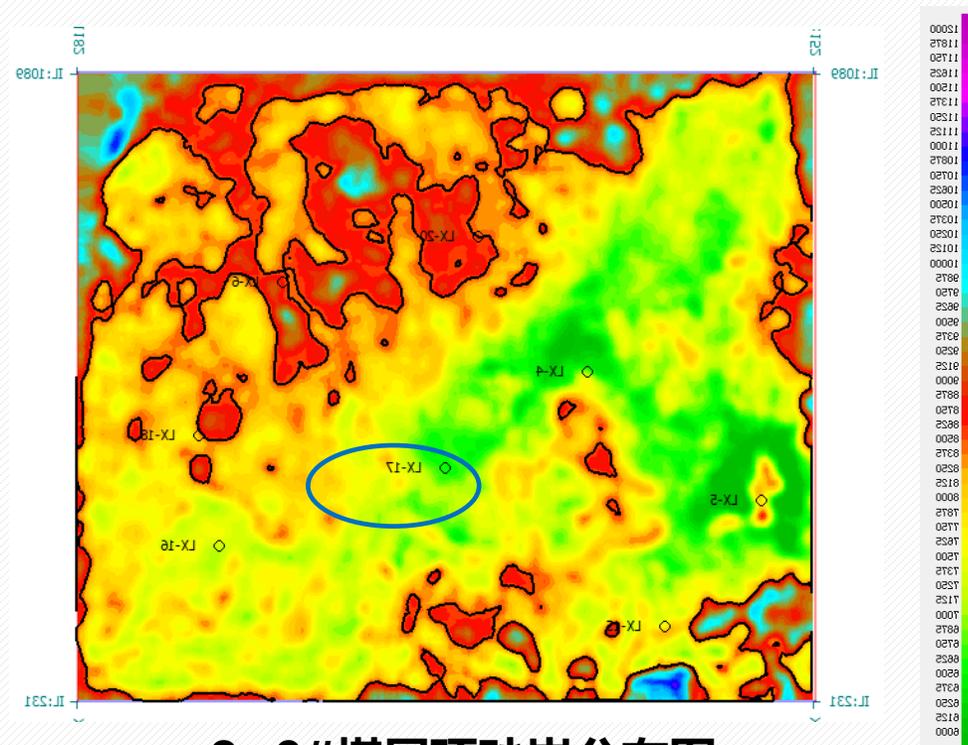


## (2) 基于地震反演的煤岩层精准预测技术

### □ 煤层及其顶底板岩性的精细描述



拟声波阻抗与纵波阻抗交会图



8+9#煤层顶砂岩分布图

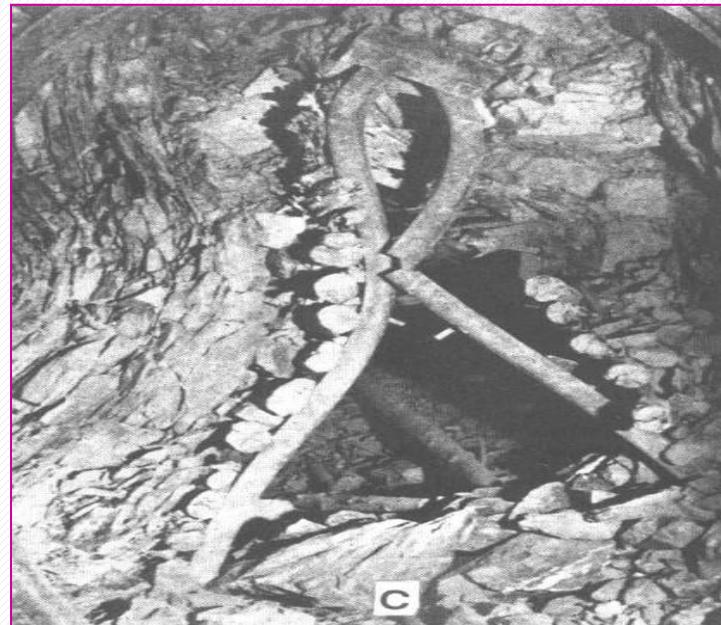
利用高精度AVO反演技术，实现某煤田煤层及顶底板岩性精细描述。



### (2) 基于地震反演的煤岩层精准预测技术

#### □ 煤与瓦斯突出隐患地震预测技术

- ✓ 煤与瓦斯突出大多发生在煤体破碎的“构造煤”中,煤体破坏程度越严重,煤的强度越低,突出危险性越大;
- ✓ 实验证明,瓦斯突出煤体在**超声波参数、弹性参数、强度参数、电阻率**等物理特性上存在明显差异,为煤与瓦斯突出区和煤层气富集区预测奠定了良好的基础。



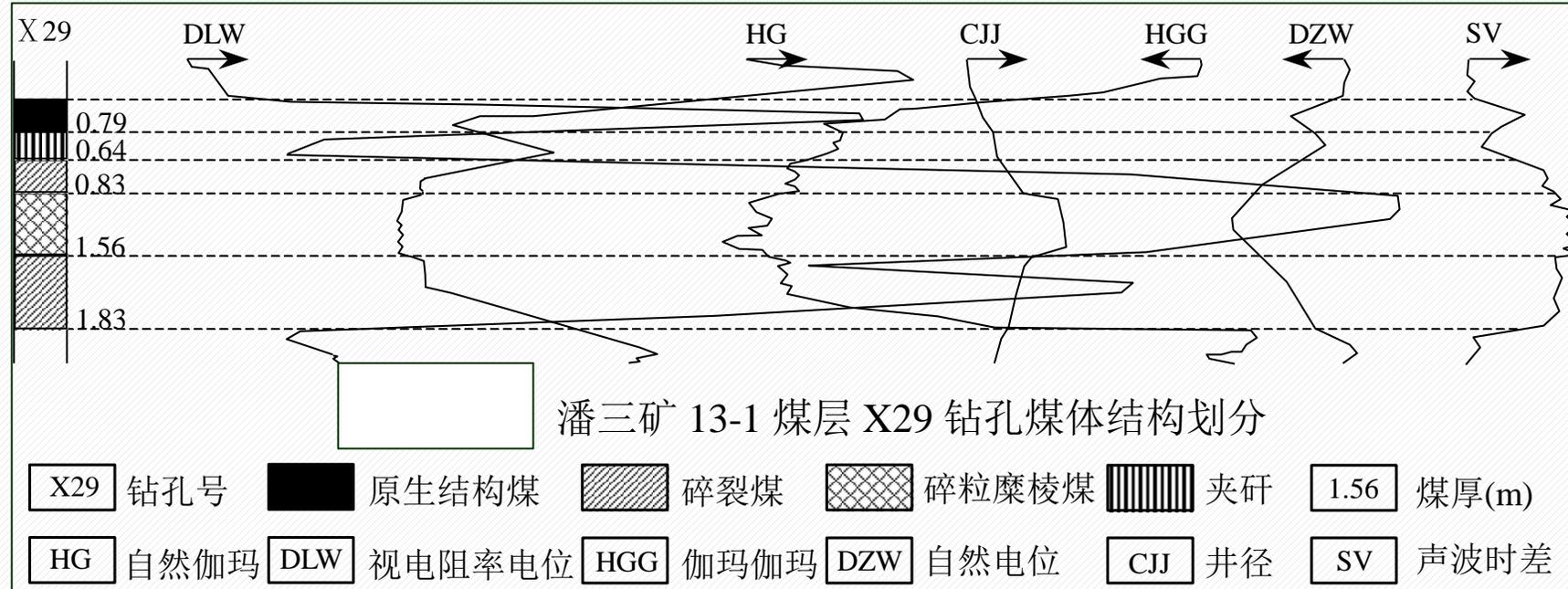
# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术



## (2) 基于地震反演的煤岩层精准预测技术

### □煤与瓦斯灾害测井分析技术

易发生煤与瓦斯突出的构造煤测井曲线表现为“三高二低”特点：**高视电阻率、高伽玛伽玛、高自然电位和低声波速度、低自然伽玛值**，并且在密度、弹性模量、泊松比等物性参数上有明显差异。



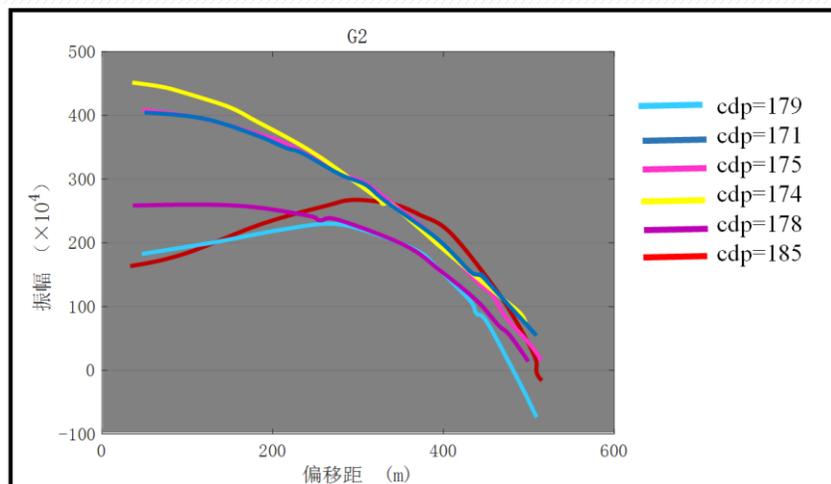
# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术



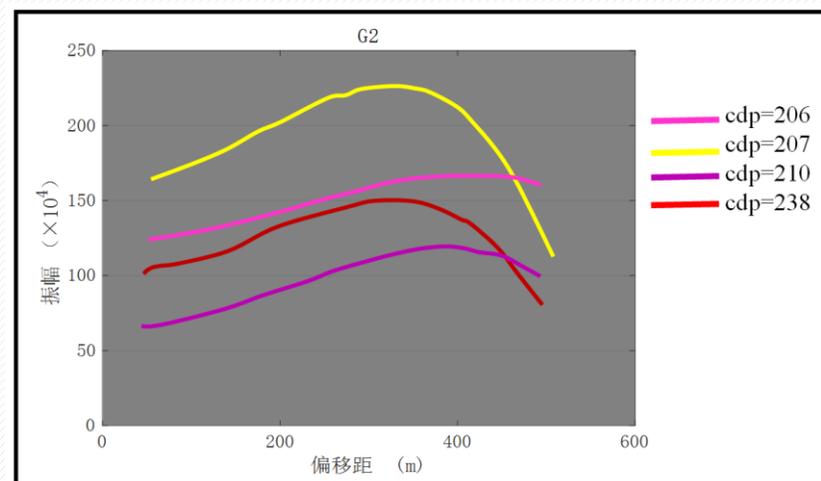
## (2) 基于地震反演的煤岩层精准预测技术

### □ 瓦斯突出煤AVO响应特征分析

构造煤的叠前弹性参数表现为低 $\lambda\rho$ 、低 $\mu\rho$ 和高纵横波速度比，并在交会图上特征明显。瓦斯突出煤层地震振幅随偏移距的增大呈下降趋势，而非突出煤层的地震振幅随着偏移距的增大呈上升趋势。



瓦斯突出煤



非瓦斯突出煤

瓦斯突出煤层与非突出煤层的AVO响应

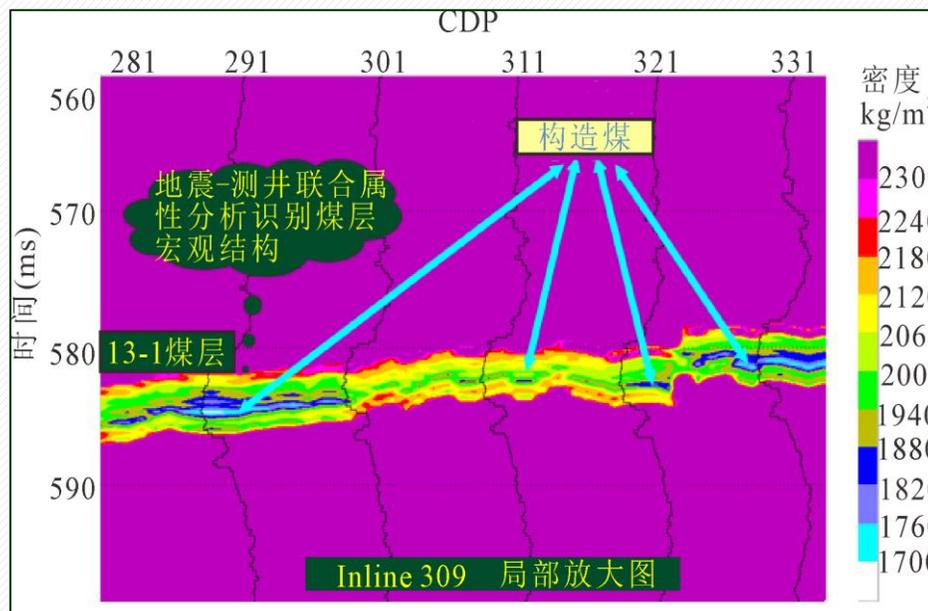
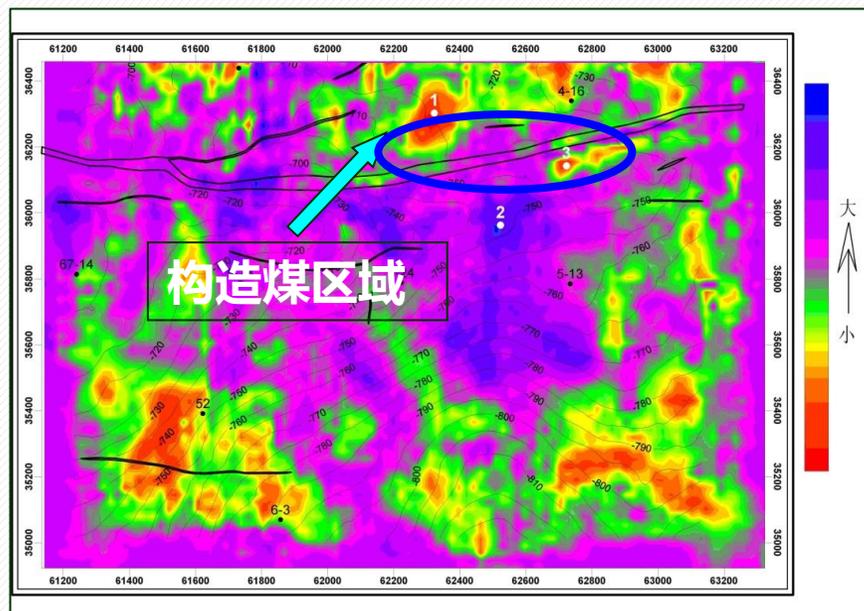
# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术



## (2) 基于地震反演的煤岩层精准预测技术

### □ 瓦斯突出煤三维地震AVO反演技术

根据瓦斯突出煤层密度小、剪切模量和体积模量小的特点，利用三维地震AVO反演技术，获取目的煤层及围岩岩性分布图，实现瓦斯突出煤体精确识别与预测。



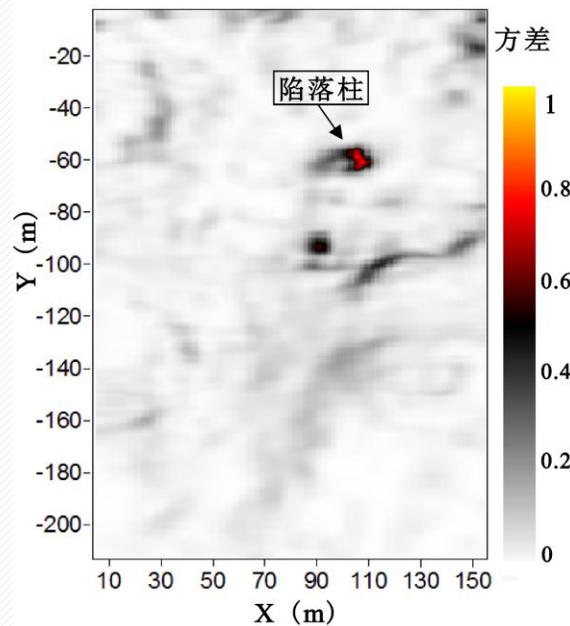
# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术



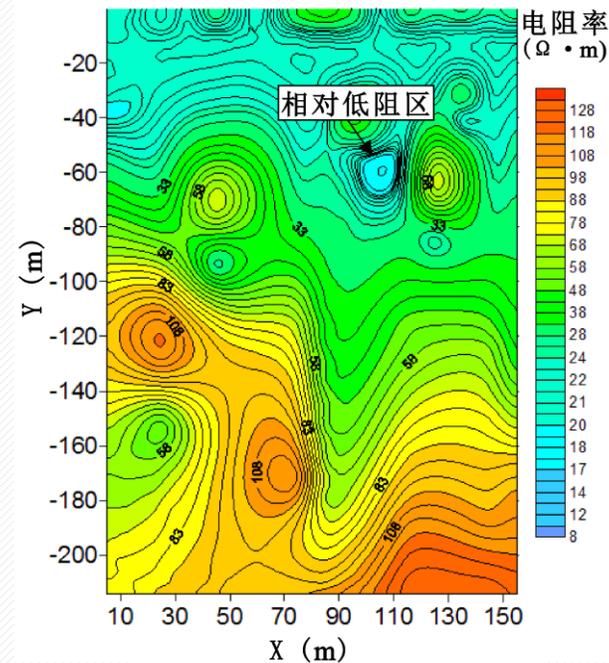
## (2) 基于地震反演的煤岩层精准预测技术

### □多物理场联合反演矿井突水隐患

利用三维高分辨率地震勘探，实现对突水构造分布的精确预测，结合矿井水低电阻率特征，采用**地震与电法联合探测**的技术，使矿井突水灾害源的预测精度得到提高。



地震探测地质异常体



电法探测低阻区

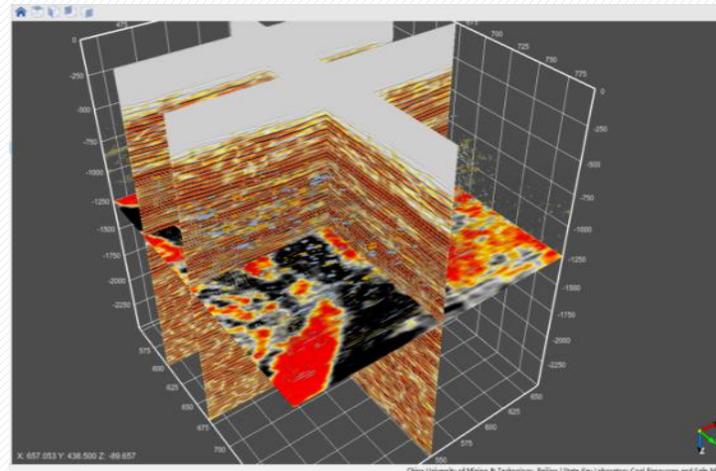
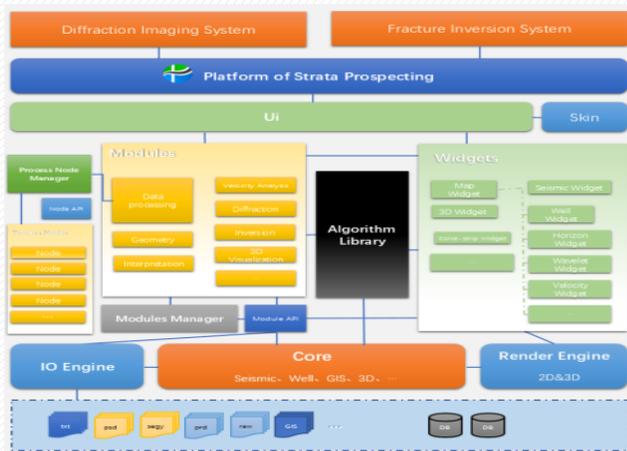
地震与电法联合预测含水陷落柱

# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术



## (3) PSP地球物理软件平台

自主研发PSP (Platform of Strata Prospecting) 地球物理软件平台，采用“1+2”研发模式，即1个基础平台，2个特色系统。基础平台具有地震数据处理、解释与反演、三维可视化等基础功能模块，进行科研、教学和生产实践；两个特色系统：绕射波成像和裂缝反演，从地震成像和反演角度出发，结合自主创新理论方法，实现地下不连续体精确刻画。



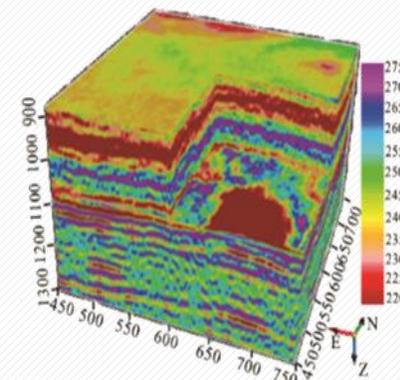
PSP平台架构及应用

# 3.1 矿井地质构造高分辨率地震成像与反演技术



## (4) 采区三维地震勘探应用情况

三维地震勘探在全国12个省50余个煤矿开展了应用，为煤矿安全高效开采提供了地质保障。获得国家科技进步二等奖3项。





### (1) 仪器装备方面：高精度防爆地质雷达主机

#### ➤ 现状

- (1) 原先仪器主机大部分采用隔爆处理，体积大、重量重，在矿井中移动探测困难。
- (2) 在数据采集中，主机最小步进太大，样点时间定位波动较大，降低深部反射信号的信噪比，导致地质雷达采集精度降低。
- (3) 无实时处理能力，无法检测现场探测数据质量。

#### ➤ 主攻目标

开发本安型具有实时处理的高精度地质雷达主机。

#### ➤ 技术难点和关键点

- 如何实现一体化主机的本安型防爆电路的设计。
- 如何提高控制单元的时间最小步进，从而提高深部信号的信噪比。
- 在矿井干扰环境，如何实现实时处理，提高有效信号的快速识别。

## 3.2 矿井本安型防爆地质雷达探测装备与技术



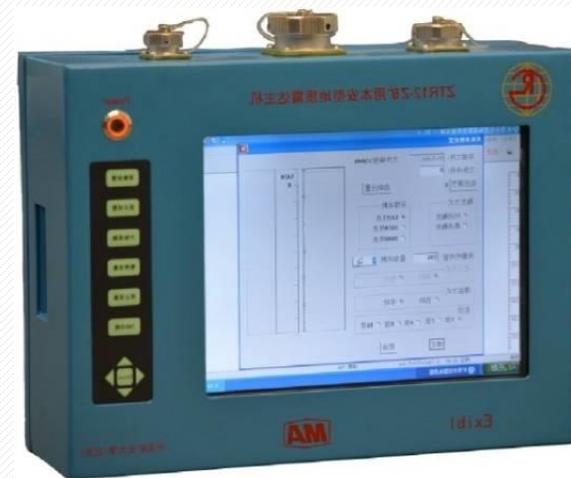
### (1) 仪器装备方面：高精度防爆地质雷达主机

#### ➤ 创新技术与发明点

- 提出基于斜波式步进延迟的可编程定时器技术。
- 大功率电源本安防爆电路设计。
- 液晶高压背光电路板的本安改进。
- 实时采集智能滤波处理技术。

#### ➤ 发明效果

- 最小时间步进从国际上普遍的5ps提高到2ps。
- 重量减轻4倍，体积减少2倍。
- 达到防尘、防撞、防水、防爆的标准。
- 智能滤波技术的突破，提高采集信号的保真度。



本安型地质雷达主机



雷达主机工作图



### (2) 仪器装备方面：宽频防爆地质雷达天线系统（地面耦合）

#### ➤ 现状

(1) 目前国内外防爆天线集中在150MHz附近，探测距离不足30m，达不到煤矿开采速度的预报距离需求，其次，在探测精度方面，无法分辨裂隙带空间分布情况。

(2) 由于目前天线带宽是天线主频的1.5倍，天线系统带宽明显不足，导致天线系统驻波干扰增大，降低了探测信号分辨率。

#### ➤ 主攻目标

开发宽频防爆地质雷达天线系统（频率范围400MHz-12.5MHz），提高地质雷达探测的深度和分辨率。

#### ➤ 技术难点和关键点

- 如何增大天线发射功率，实现80m距离的地质超前预报。
- 如何减小天线内部部件之间和天线与环境之间的驻波信号。
- 矿井复杂环境下，如何解决低频雷达防爆天线大尺寸与矿井小空间的矛盾。

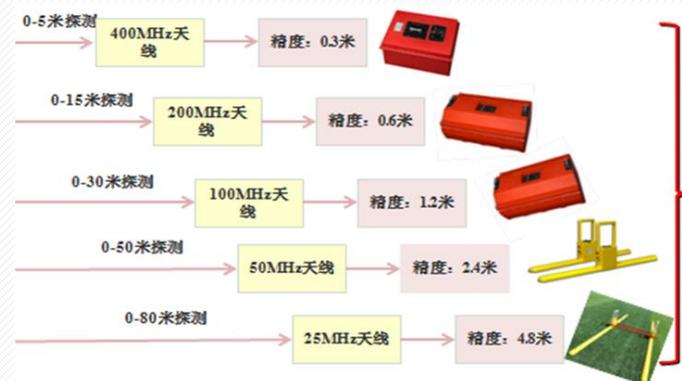
## 3.2 矿井本安型防爆地质雷达探测装备与技术



### (2) 仪器装备方面：宽频防爆地质雷达天线系统（地面耦合）

#### ➤ 创新技术与发明点

- 开发出下降和上升沿不对称的发射机。
- 开发了定向天线发射控制技术。
- 提出水平IIR预测滤波算法。



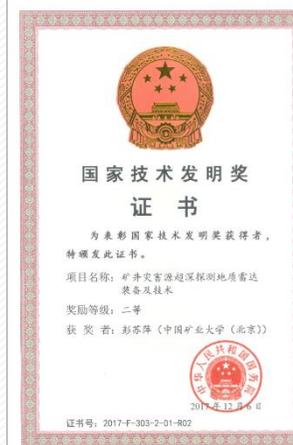
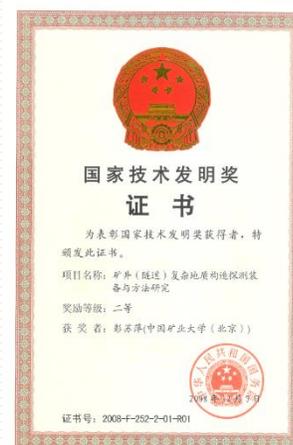
宽频防爆系列雷达天线



低频天线组合安装示意图

#### ➤ 发明效果

- 发射信号带宽提高了30%。
- 接收机灵敏度从 $150\mu\text{v}$ 提高到 $50\mu\text{v}$ 。
- 探测深度由原来30m提高到80m，400MHz天线最小分辨率达到0.05m，50MHz天线最小分辨率达2m。
- 获得国家技术发明奖2项，中国专利金奖1项。



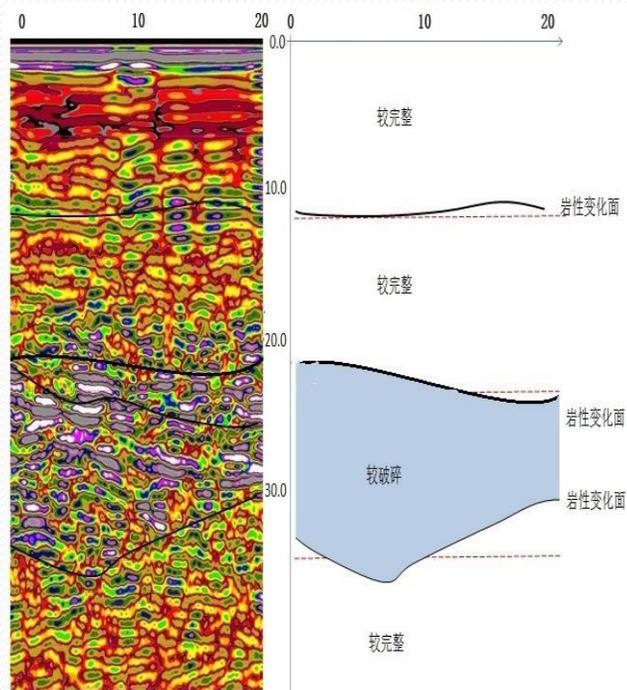
## 3.2 矿井本安型防爆地质雷达探测装备与技术



### (2) 仪器装备方面：宽频防爆地质雷达天线系统（地面耦合）

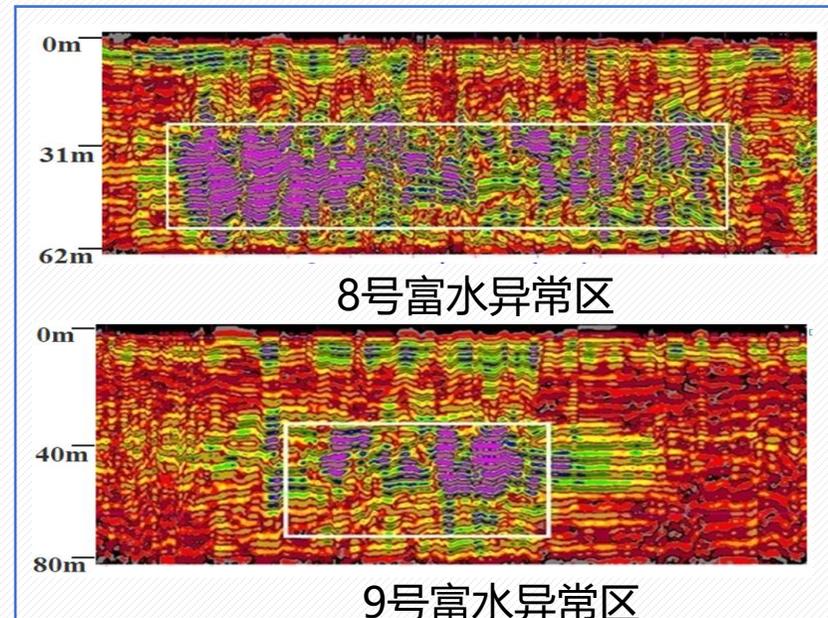
#### 矿井超前探测应用

2017年，在中煤平朔井工三矿34201工作面中切眼处超前探测小构造，最大探深50m，经钻探验证YS3点前方12-15m、27-32m和39-45m分别赋存3个断层面，与探测结果基本相符。



#### 矿井富水区探测应用

2015年，在宁夏盐池县宋新庄煤矿主斜井侧帮，对地下流沙层暗河进行反射法探测，最大探深90m，探明富水异常区域两处，深度分别为27-53m、35-74m，后获得钻探验证。

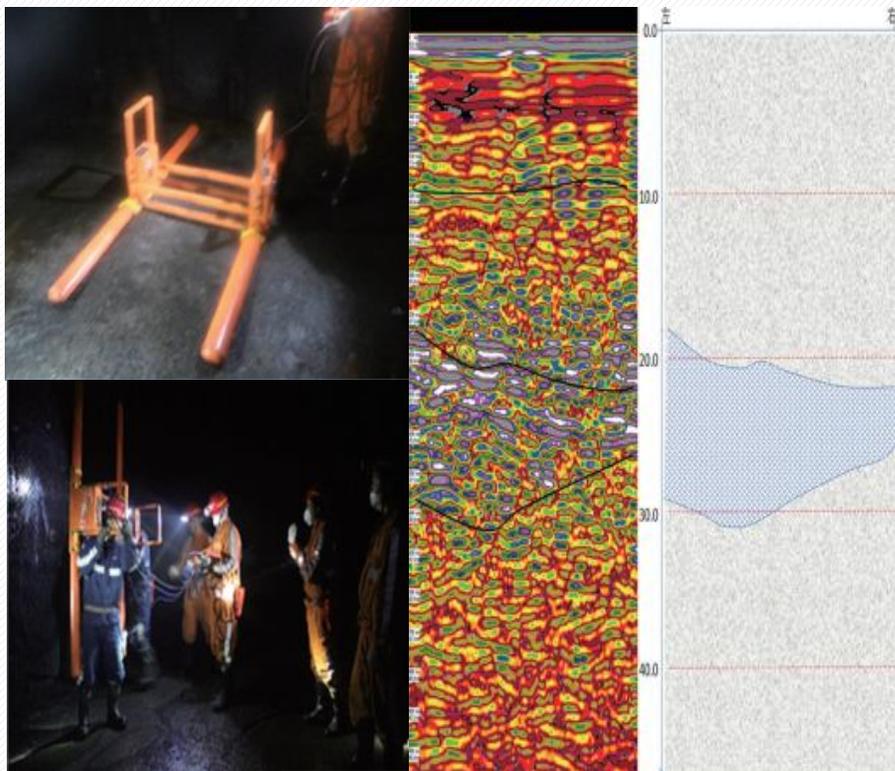


## 3.2 矿井本安型防爆地质雷达探测装备与技术



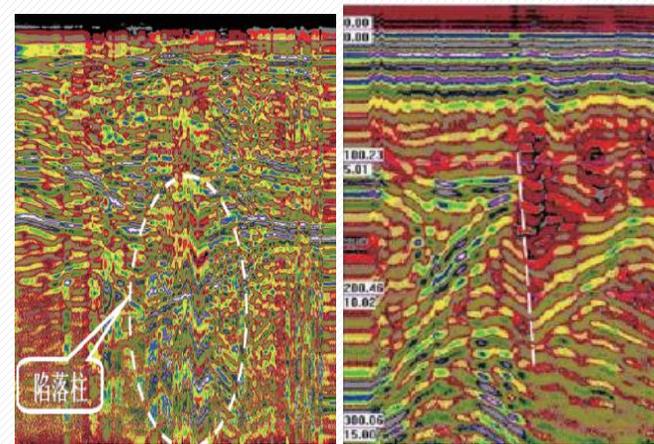
### (2) 仪器装备方面：宽频防爆地质雷达天线系统（地面耦合）

#### 矿井不良构造探测



侧帮探测剖面

在神东煤炭公司大柳塔煤矿等矿井采用ZTR12-2本安型防爆地质雷达对断层进行了超深探测，为后续安全开采提供了参考资料。



矿井煤层陷落柱、小断层探测

在中煤集团平朔井工三号巷道侧帮针对30m范围内小断层进行了地质雷达探测。

## 3.2 矿井本安型防爆地质雷达探测装备与技术



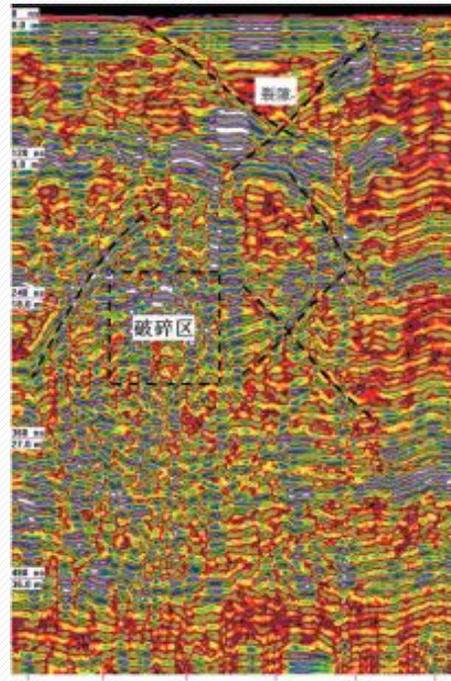
### (2) 仪器装备方面：宽频防爆地质雷达天线系统（地面耦合）

#### 地下煤炭火烧区探测

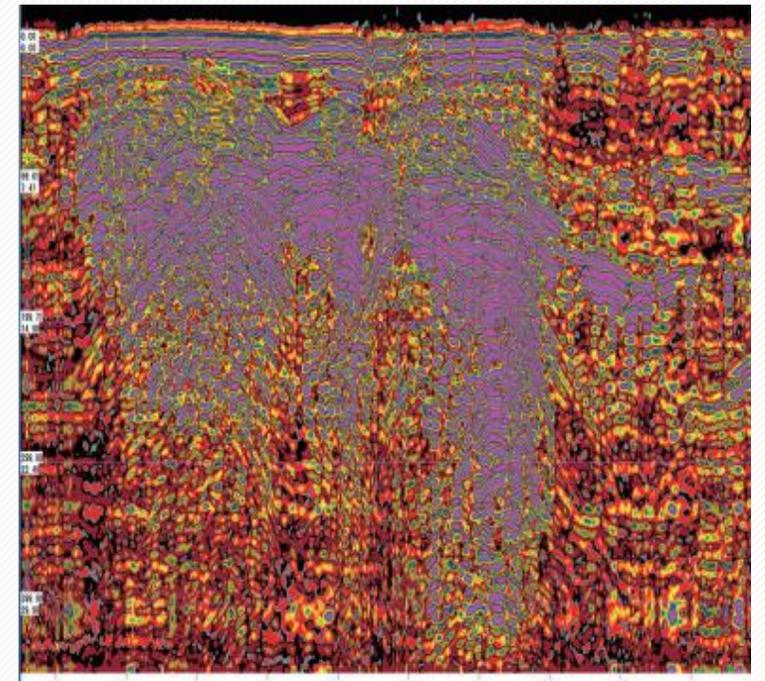
煤火是伴生煤炭资源开发的一种灾害，在世界主要产煤国普遍存在。煤火不仅燃烧损失大量煤炭资源，还会对区域环境产生严重影响。



采用ZTR12地质雷达在内蒙古乌达煤田18#火区以及宁夏神宁集团白茆沟煤矿红湾新火区对地下煤火燃烧造成的塌陷破碎带进行探测，为灭火提供地质资料。



煤火燃烧后形成的破碎区/裂隙



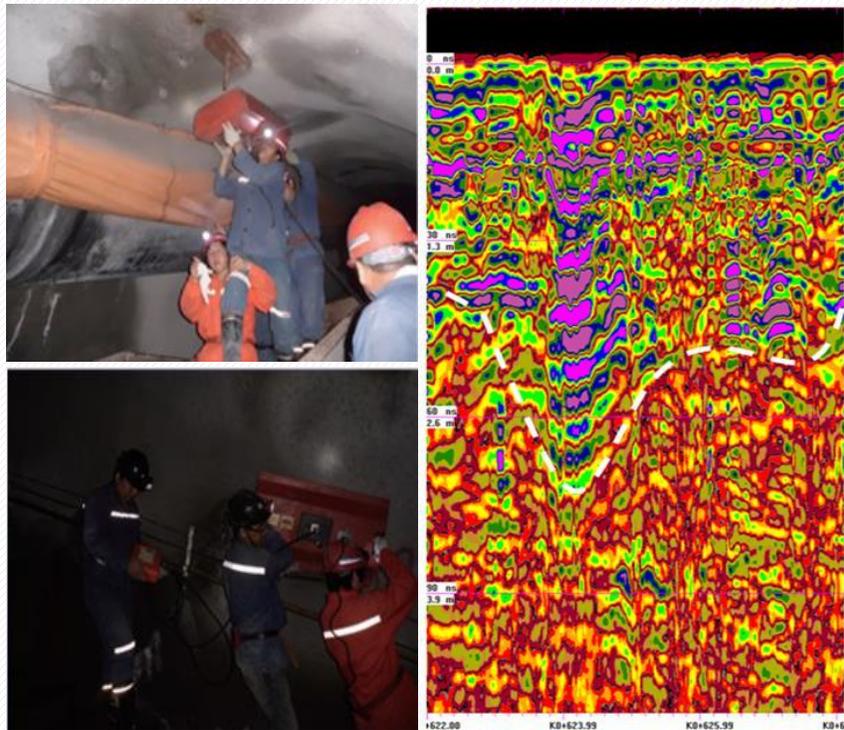
废弃巷道与采空区

## 3.2 矿井本安型防爆地质雷达探测装备与技术



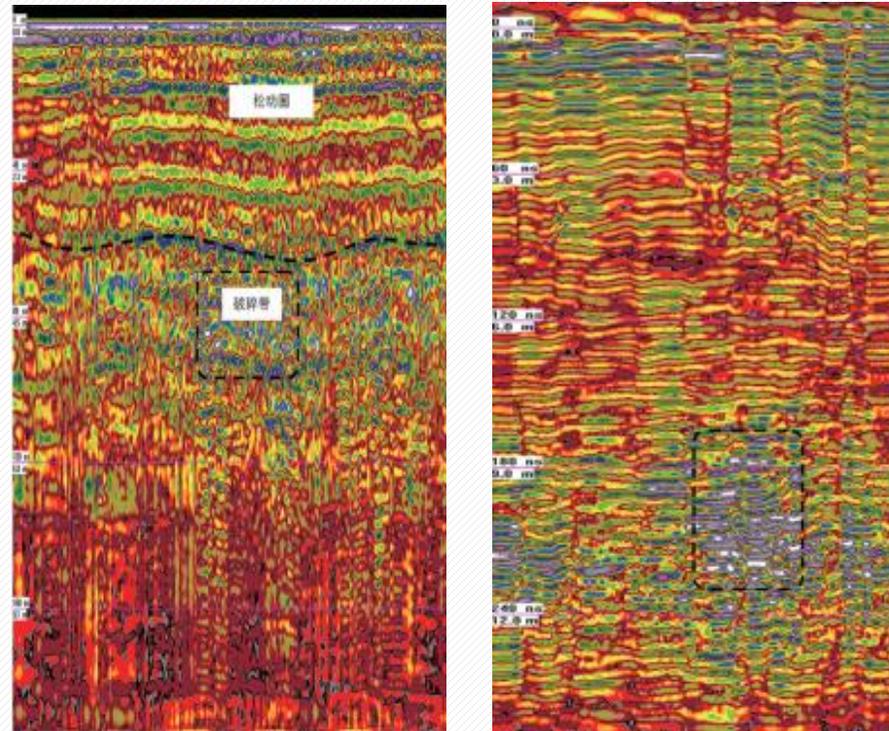
### (2) 仪器装备方面：宽频防爆地质雷达天线系统（地面耦合）

#### 矿井冒顶区域探测



使用ZTR12矿用本安型地质雷达对宁夏万和利煤炭有限公司罗花崖煤矿主斜井、副斜井以及风斜井巷道冒顶段进行探测。

#### 开采沉陷区探测



对华恒矿业煤矸石充填质量采用地质雷达探测，并对已采煤层顶板围岩松动圈及破碎区域采用ZTR12防爆地质雷达进行了探测。

## 3.2 矿井本安型防爆地质雷达探测装备与技术



### (3) 仪器装备方面：矿井煤岩界面探测地质雷达系统（空气耦合）

#### ➤ 现状

- (1) 基于三维地震勘探建立的透明工作面精度低（3m），难以满足远程无人化操控的“厘米级”精度需求。
- (2) 现有 $\gamma$ 射线、光谱检测等探测方法因深度和精度不足而未实际应用。
- (3) 地质雷达分辨率高，但受制于能量衰减，雷达天线要贴着巷道壁，且不能与采煤机联动，难于推广。

#### ➤ 主攻目标

开发非接触式煤岩界面探测地质雷达系统(频率范围1500MHz-900MHz )，实现煤岩界面的高精度、连续、实时探测。

#### ➤ 技术难点和关键点

- 如何提高雷达波能量聚焦和辐射增强能力。
- 如何减小天线悬空后与巷道壁的耦合干扰。
- 如何建立煤岩界面探测的智能识别模型。

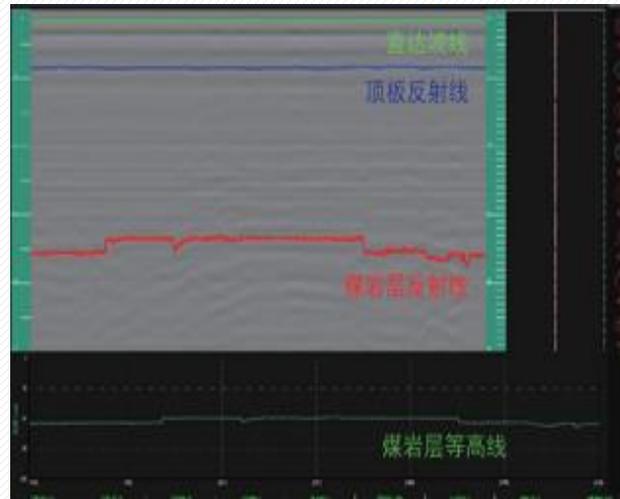
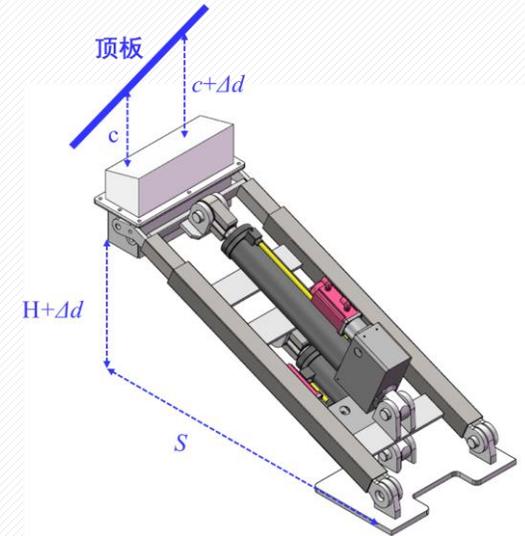
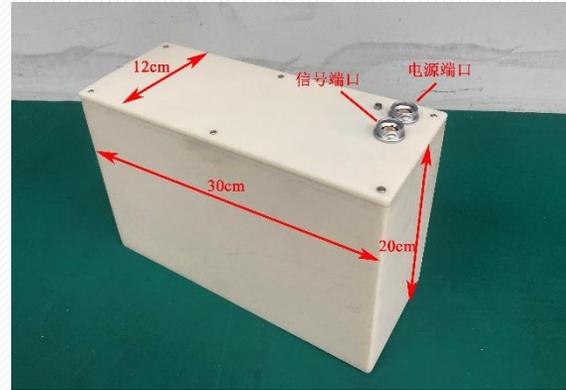
## 3.2 矿井本安型防爆地质雷达探测装备与技术



### (3) 仪器装备方面：矿井煤岩界面探测地质雷达系统（空气耦合）

#### ➤ 创新技术与发明点

- 防爆屏蔽喇叭天线技术；
- 矿井煤岩智能支架及安全防护技术；
- 煤岩层位的实时跟踪与自动识别技术；
- 煤岩层位的信息提取技术研究。



# 3.2 矿井本安型防爆地质雷达探测装备与技术



## (3) 仪器装备方面：矿井煤岩界面探测地质雷达系统（空气耦合）

### ➤ 发明效果

- ❖ 开发的煤岩识别天线体积缩小了1/3，重量减少了1/2，非接触探测。
- ❖ 天线带宽大于主频2倍以上。
- ❖ 探测精度由0.6m提高到0.2m。



神东锦界煤矿煤岩识别探测现场



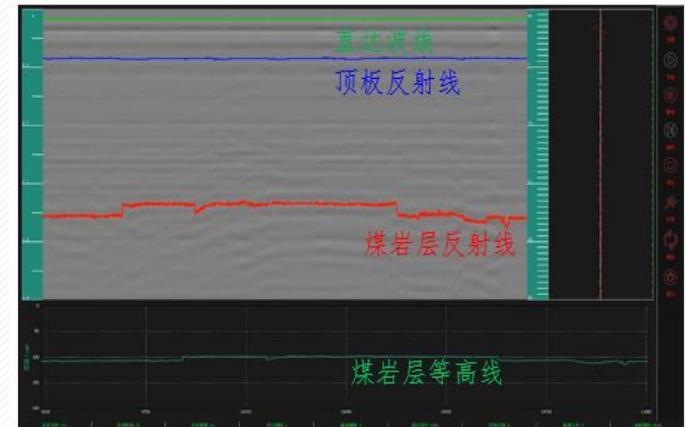
中国发明专利



美国发明专利



矿井应用



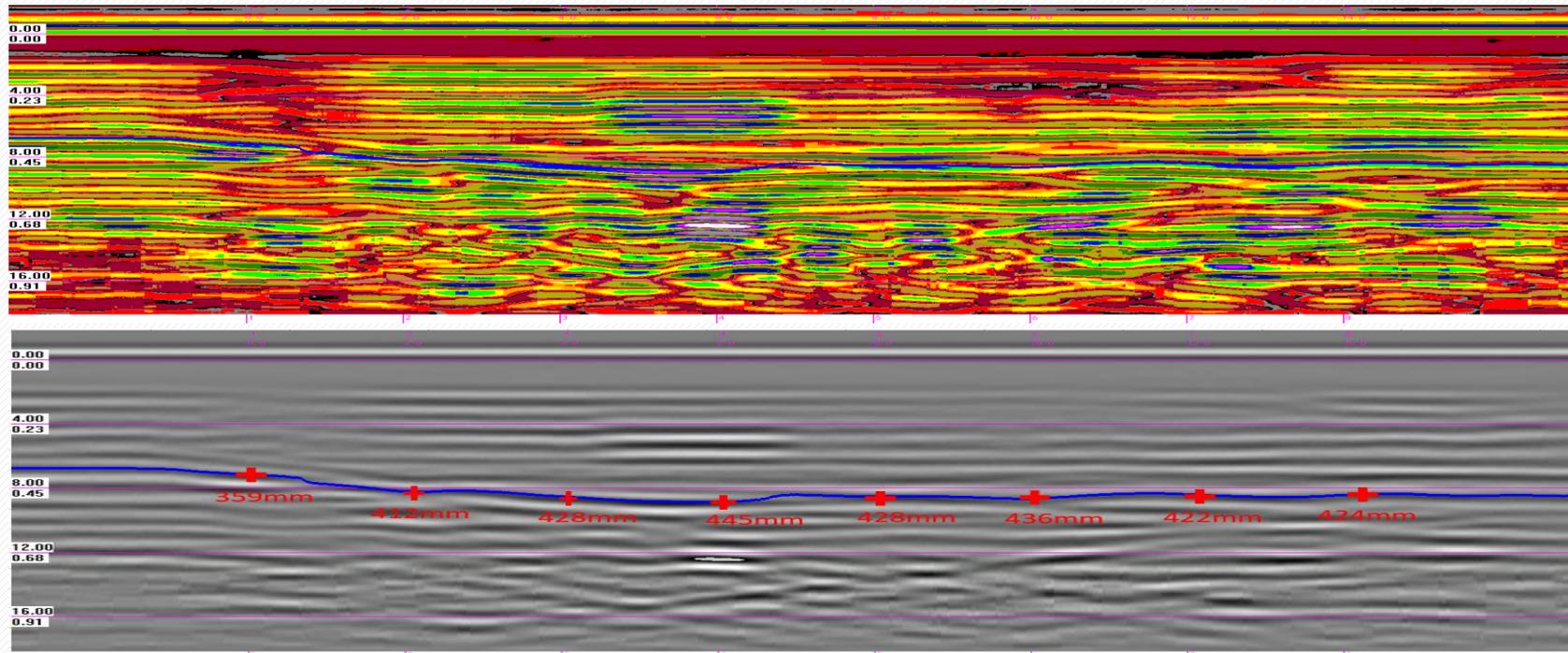
煤岩层位识别

授权专利技术并在5个煤矿推广应用

## 3.2 矿井本安型防爆地质雷达探测装备与技术



煤岩层位探测现场视频



雷达图谱及追踪层位

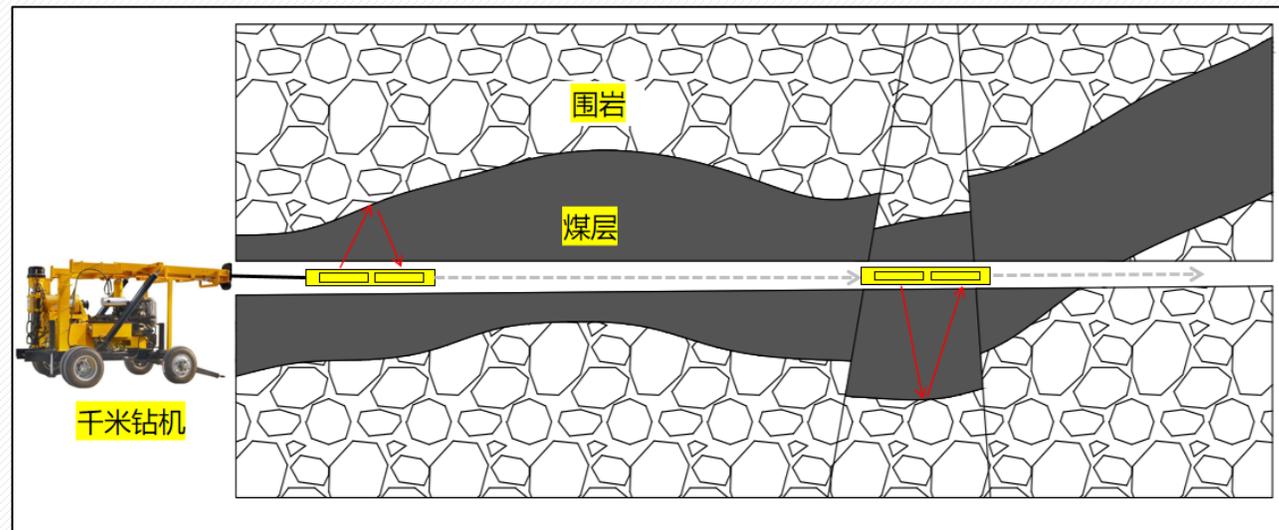
## 2.3 定向钻孔地质雷达探测装备与技术



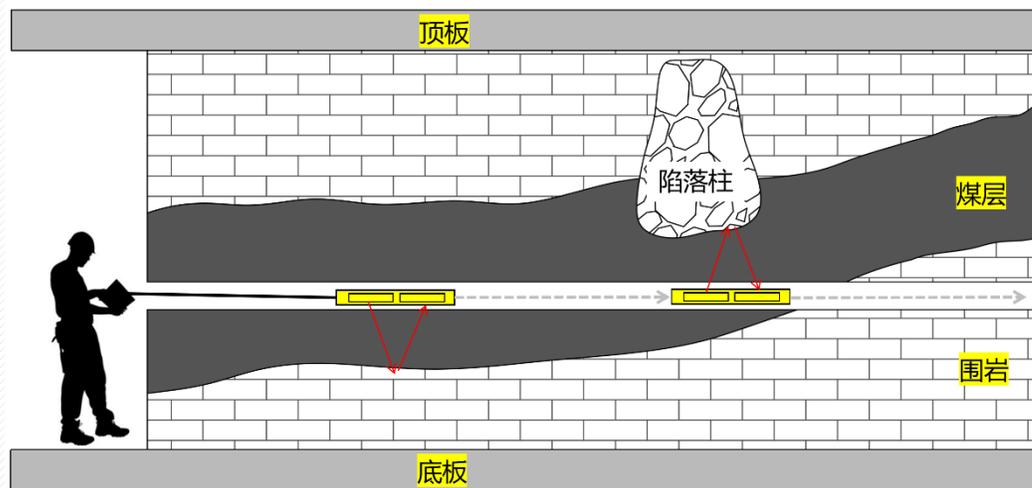
### ■ 定向钻孔雷达的井下应用需求

针对煤层地质情况，应用定向钻孔地质雷达进行探测，提前获取煤层厚度、走向以及地质异常体（断层与陷落柱）信息，实现地质透明化。主要包括：

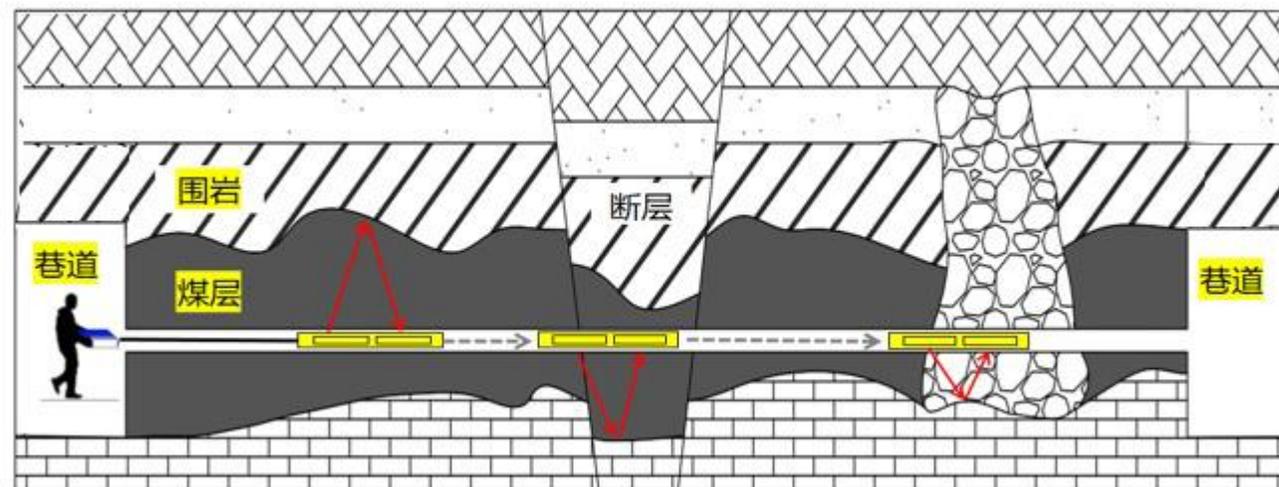
- 掘进面超前探测
- 煤层走向探测
- 巷道工作面透明化高精度探测



煤层厚度及走向探测



煤层掘进面超前探测



巷道工作面透明化高精度探测

## 2.3 定向钻孔地质雷达探测装备与技术

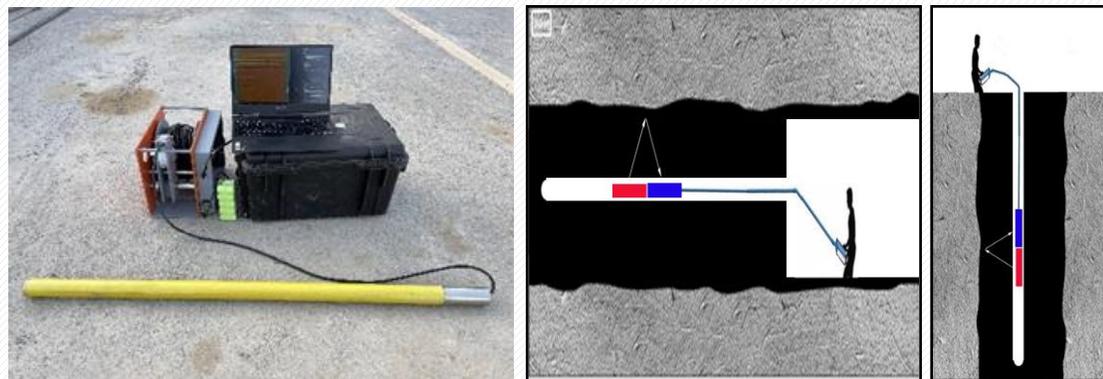


### ■ 定向钻孔雷达装备

定向高精度钻孔雷达包括钻孔雷达数据采集及其辅助装置。

**(1) 有线采集。**该型号雷达包括钻孔雷达天线、采集主机和绞盘，可应用于**矿井地质透明化探测、城市深部地质结构、大坝隐蔽结构**的高精度探测。单孔反射法探测距离大于10m、探测深度为0-100m，可识别最小分辨率为0.3m。

**(2) 无线采集。**该型号雷达包括钻孔雷达天线、采集主机，采集系统安置在钻杆内部，实现数据的自动采集和存储。主要应用于**矿井隐伏地质结构、石油地质等百米及千米深度**的高精度探测。单孔反射法探测距离大于10m，可识别最小分辨率为0.3m。



定向钻孔雷达（有传输线缆）



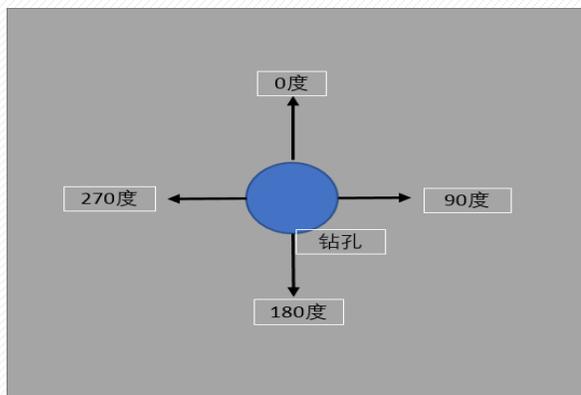
定向钻孔雷达（无传输线缆）

## 2.3 定向钻孔地质雷达探测装备与技术

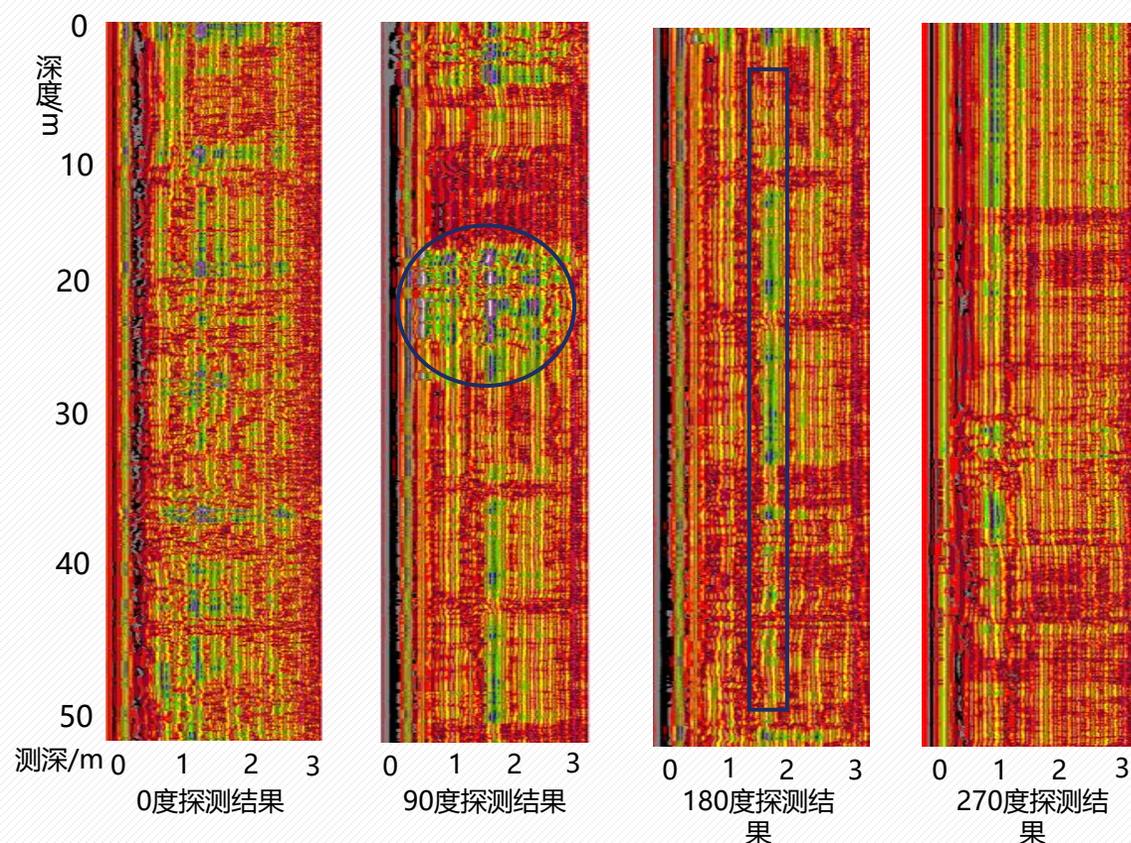


### 案例-煤层厚度探测

2021年4月，应用钻孔雷达在贵州金彩黔煤矿开展了煤层迎头面实地探测。根据探测结果，在探测角度90°深度为20m左右有富水区域；在探测角度180°距离钻孔1.5m处有清晰的煤岩界面。



煤层迎头面探测现场

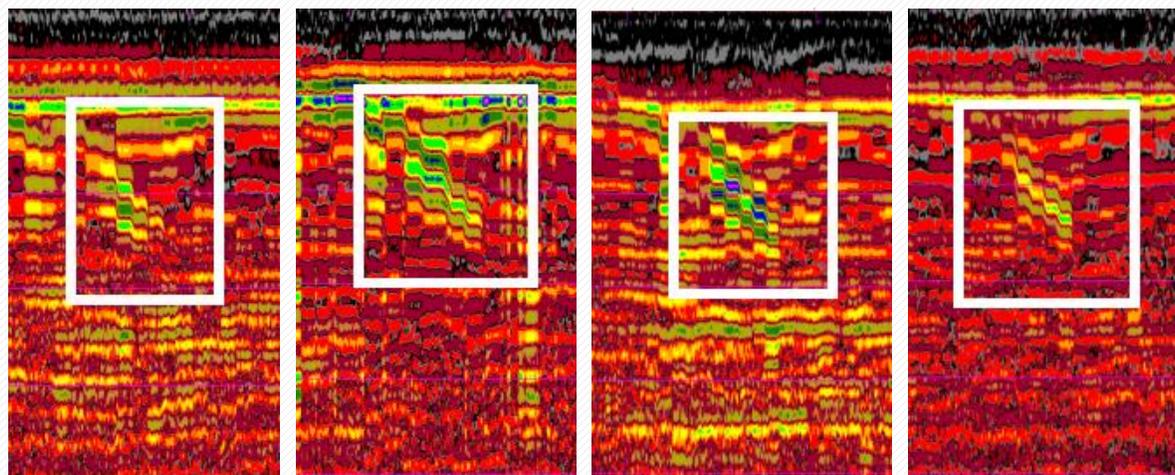


煤层迎头面探测结果

## 2.3 定向钻孔地质雷达探测装备与技术

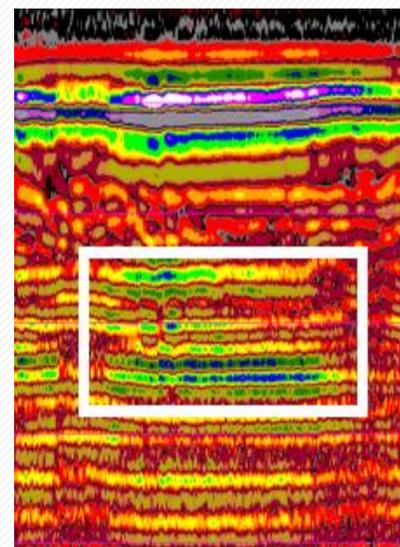
### □ 案例-断层小构造探测

2023年5月18日，应用900M定向钻孔雷达在贵州省织金县杨柳煤矿对煤层进行定向探测实验，实验共布设测线28条，总测线长度达到732m，共测得4处异常。其中在距离钻孔口38.2m处，在与正上方向夹角为200°方向，探测一处明显断层面，结合现场及资料，推测该处存在煤岩界面的断层，此外钻孔还发现2处富水异常区。



(1) 90° (2) 180° (3) 225° (4) 270°

钻孔雷达断层探测结果



富水异常体探测



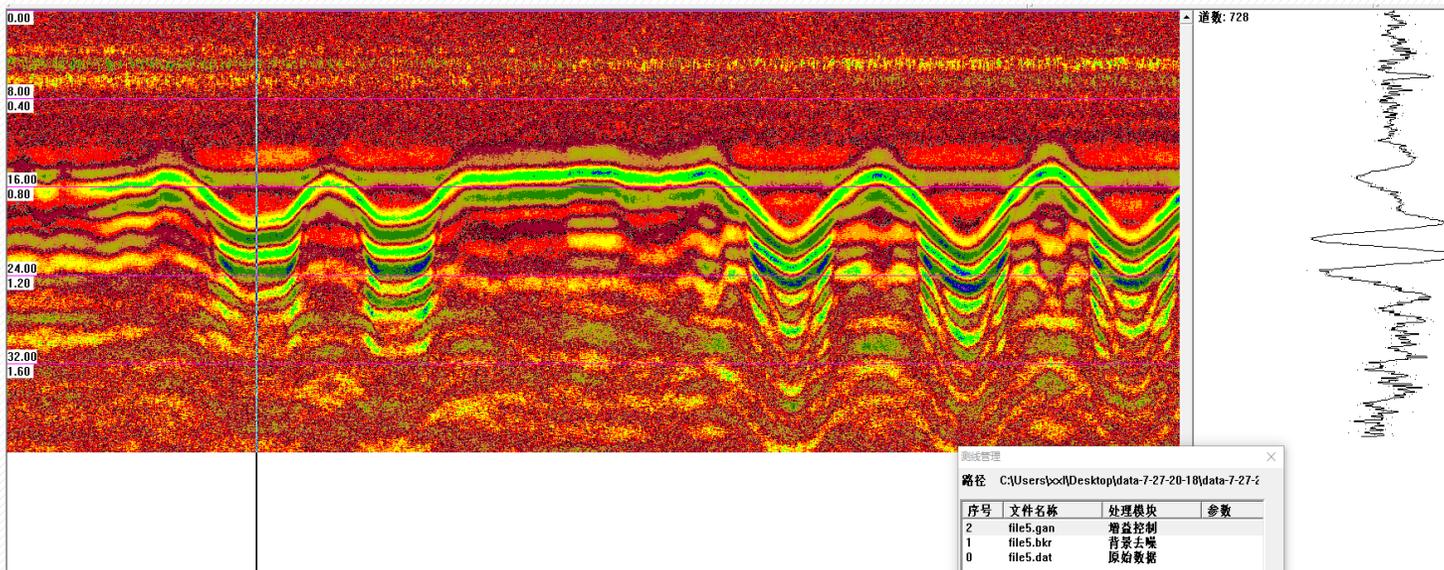
井下钻孔探测现场

## 2.3 定向钻孔地质雷达探测装备与技术



### 案例-2000m深部地质地层探测

开发的无线定向钻孔地质雷达天线，该雷达系统以钻杆为载体，采用一发两收的工作形式，实现数据的采集与存储，已经应用于石油地质地层探测工程实践中（2000m深度）。



无线定向钻孔雷达数据处理结果



无线定向钻孔地质雷达



### ➤ 现状

- (1) 地质地震成果等**信息使用效率低**，尚不能有效的指导煤矿智能化开采。
- (2) 目前数字化成果大都是由组态软件成果界面模拟的，缺乏地质信息建模及地面地下地理空间的时空关系，**不能反映真实的三维开采环境**。
- (3) 信息化数字化软件**操作复杂**，专业知识要求高，作业人员不易掌握。

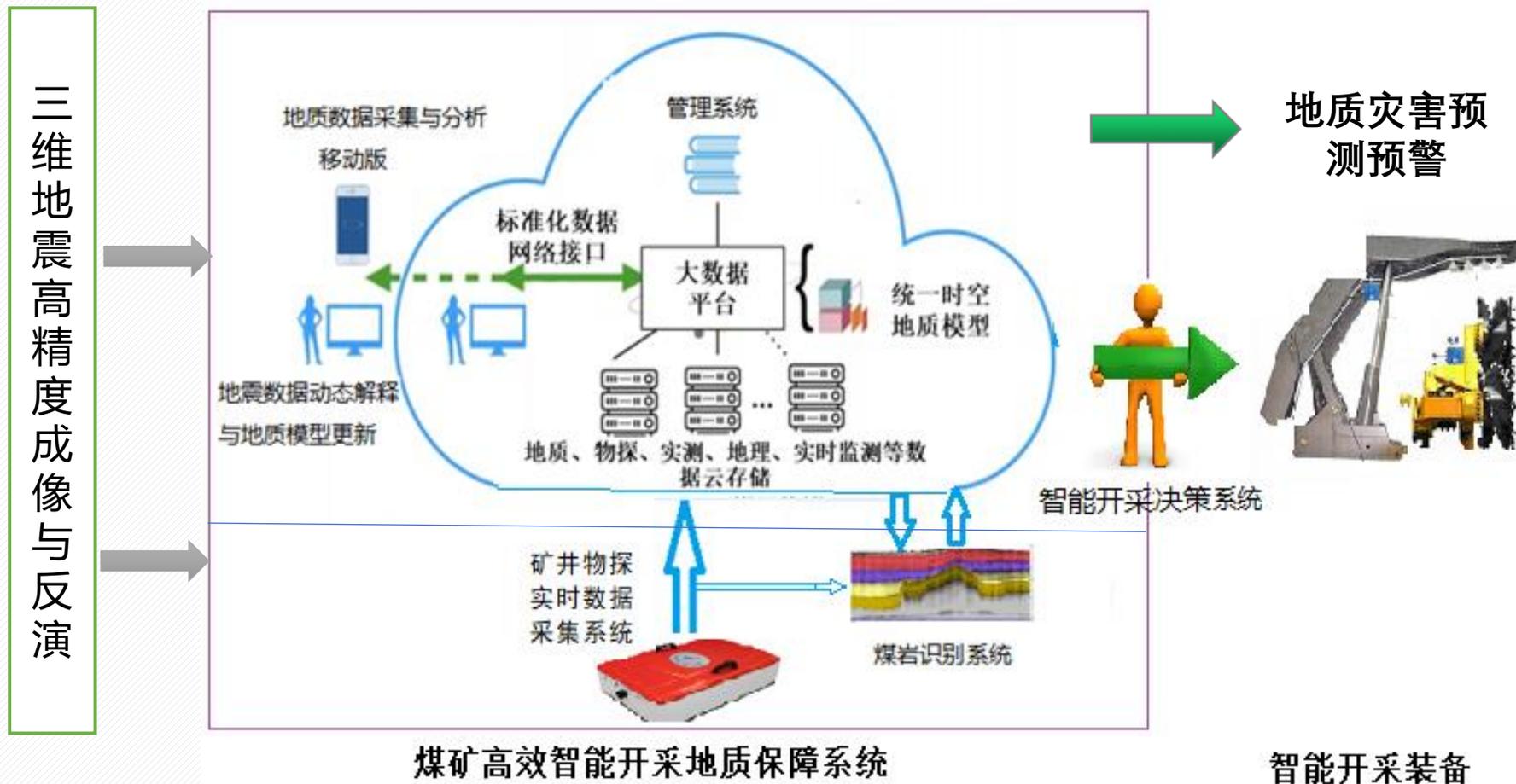
### ➤ 主攻目标

围绕现代化矿山安全、高效、智能的建设目标，构建高密度井上下综合地质平台。

### ➤ 技术难点和关键点

- 如何利用物联网、大数据、虚拟现实、图像处理、图形学、人工智能等技术，搭建空间大数据多源异构信息融合架构。
- 如何利用地质、地震、地质雷达及生产资料进行三维空间定位和建模。
- 如何研究开发一个可靠性和适用能力强、智能易操作的综合地质平台。

### 3.3 矿井地质安全保障技术及智能开采管控平台



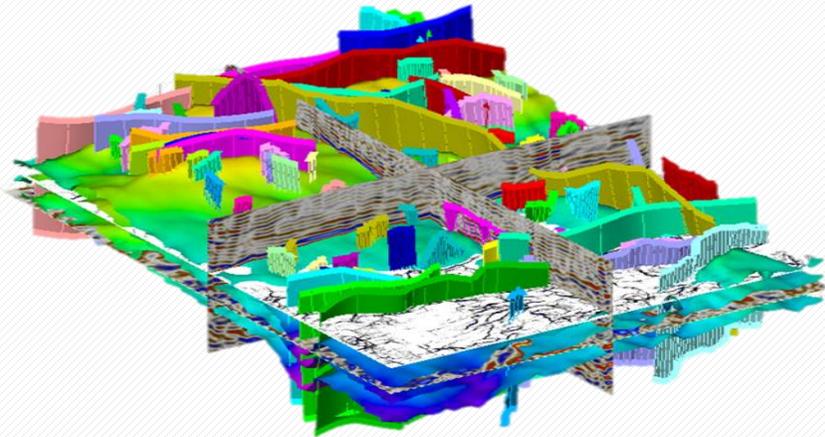
多源地质物探数据智能采集、精细解释、动态融合，为煤炭智能化/少人化开采、矿井地质透明化提供精准地质保障。



#### ➤ 核心思想：三个尺度，一个模型

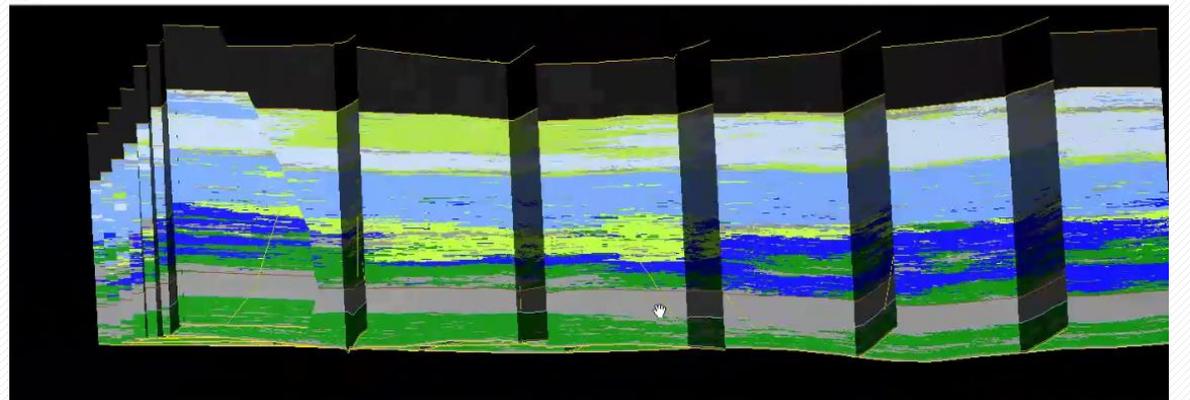
##### ● 不同勘探尺度保障地质模型精度

- 全井田三维地震勘探 (3m)
- 综采工作面矿井物探、测井等多源数据融合 (0.5m)
- 工作面地质雷达超前探测与煤岩识别 (0.1m)



##### ● 时空统一的地质模型

利用三个尺度的多源物探资料、地质数据以及动态数据构建高精度的构造、岩性和物性参数等统一、标准化、网格化的地质模型，实现**煤矿全三维地质空间“一个模型”**，服务煤矿地质灾害预警、智能开采等

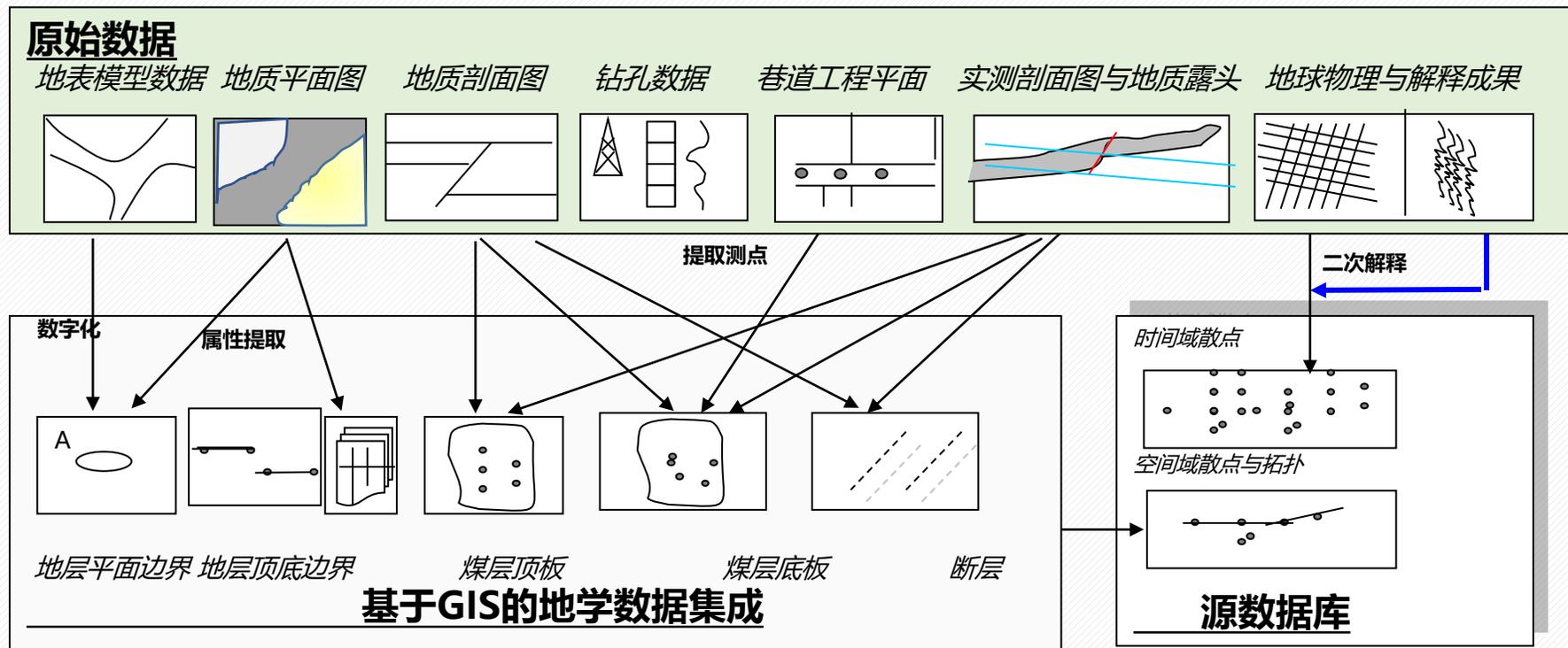


# 3.3 矿井地质安全保障技术及智能开采管控平台



## (1) 多源数据的集成化管理

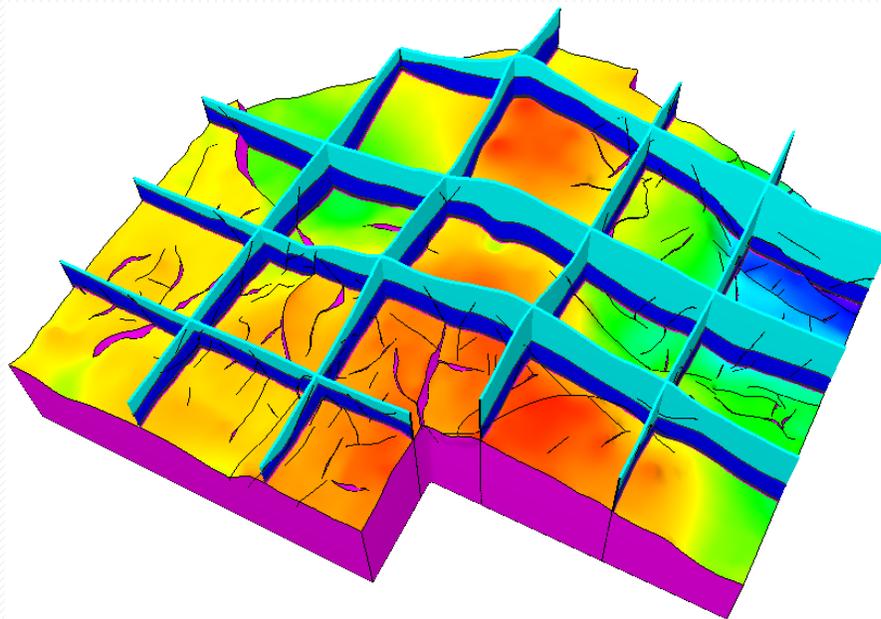
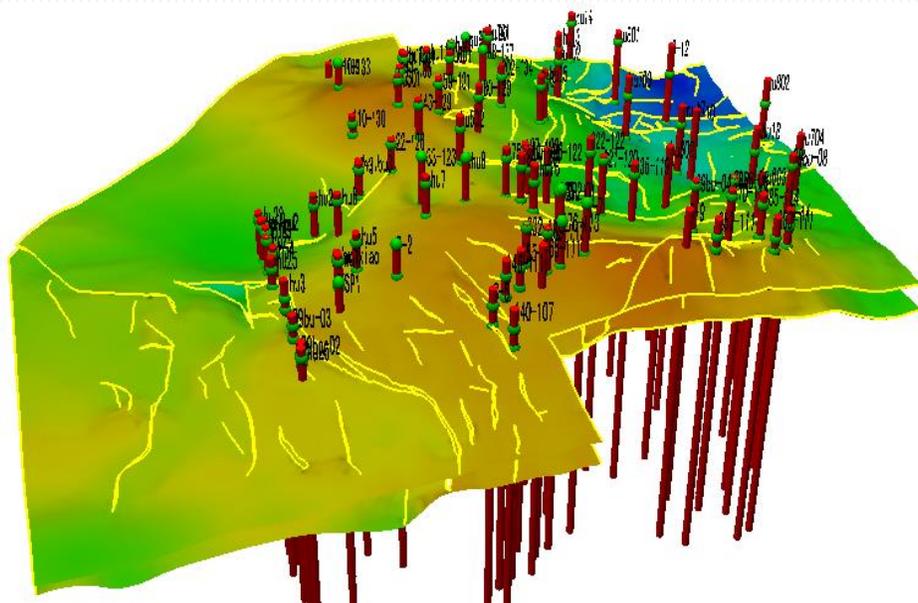
- 数据的规范化采集
- 规范化表达
- 基于GIS平台实现数据的集成化管理





#### (2) 构建多尺度基础地质框架模型

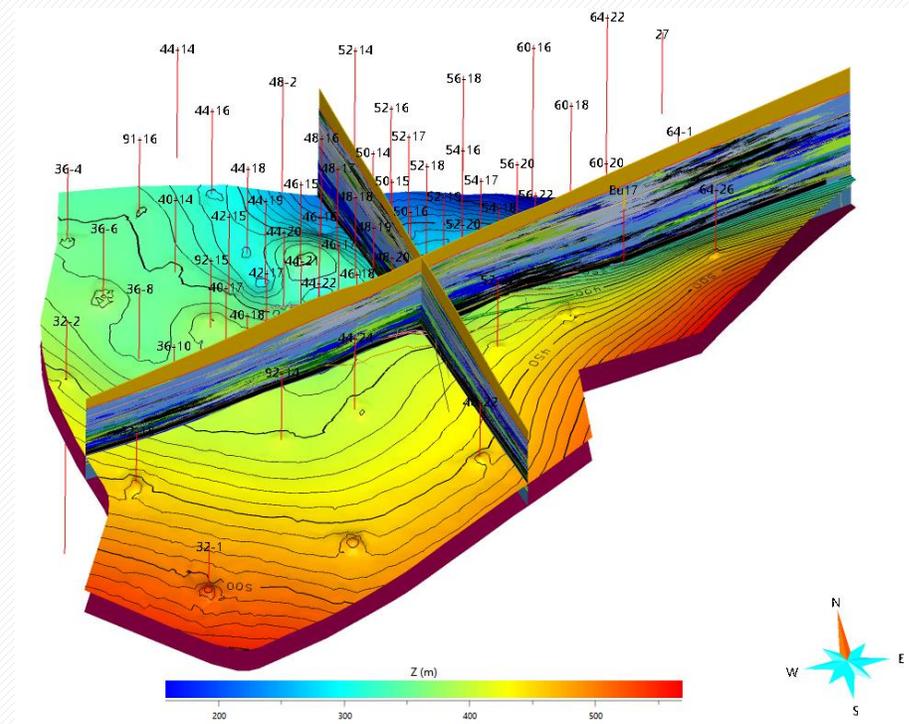
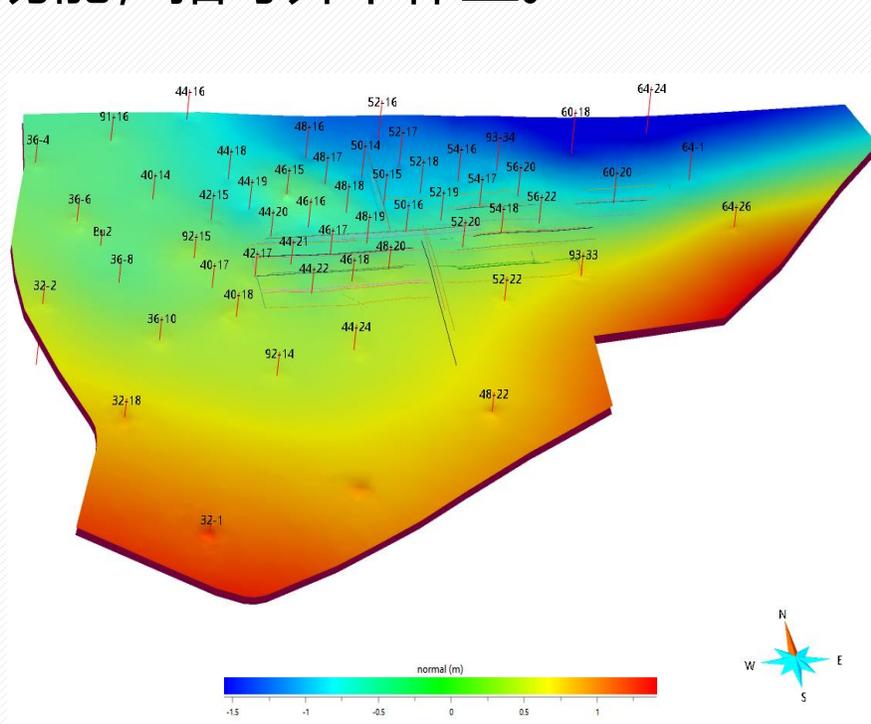
利用钻探、测井以及三维地震等发挥各种地学数据的精度优势，构建并动态修正高精度透明化地质模型，以反映矿体的最新几何和属性分布状态；精细描述断层等地质构造、陷落柱、采空区、老窑等。





## (3) 地质模型动态更新

实时监测及预警：模型实时修正与地质评价以及地质构造情况。根据生产过程的井巷地质揭露，重新修正三维地质模型，不断提高模型的精度，并具备对历史数据的回溯和对比功能，指导井下作业。



### 3.3 矿井地质安全保障技术及智能开采管控平台

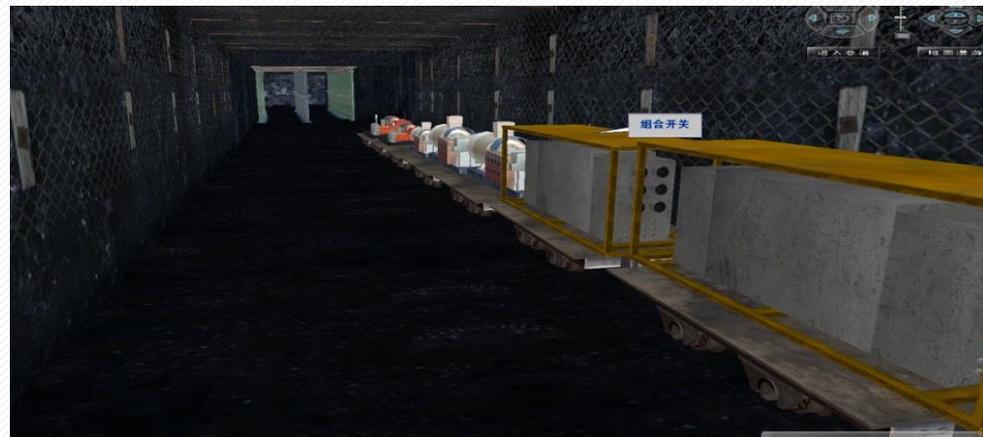


#### (4) 地上地下的一体化虚拟、真实再现

- 采用3D-GIS技术和虚拟仿真技术
- 实现了矿山三维全息化构建、地表场景再现、地测数据管理、巷道、三维地质模型、设备和生产信息管理等多项功能
- 完成多类数据信息的可视化集成，数据可视化管理、人员培训与辅助决策等业务
- 矿山场景超大量数据渲染优化显示



工业广场



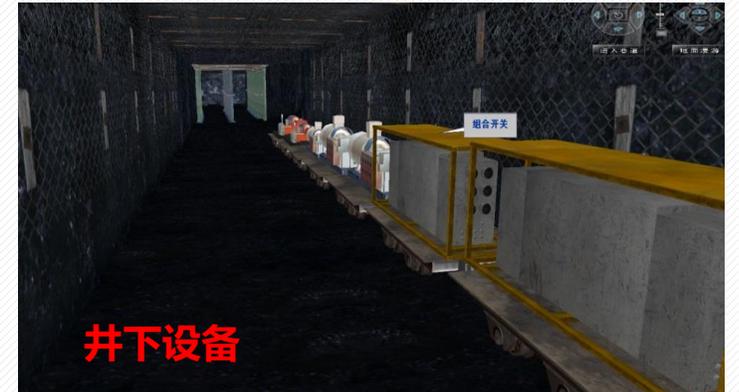
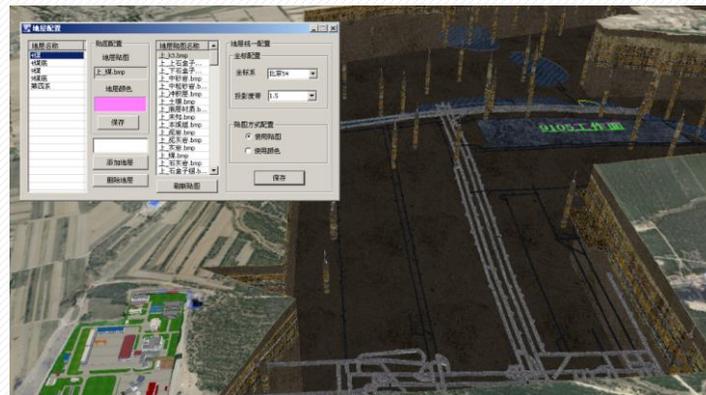
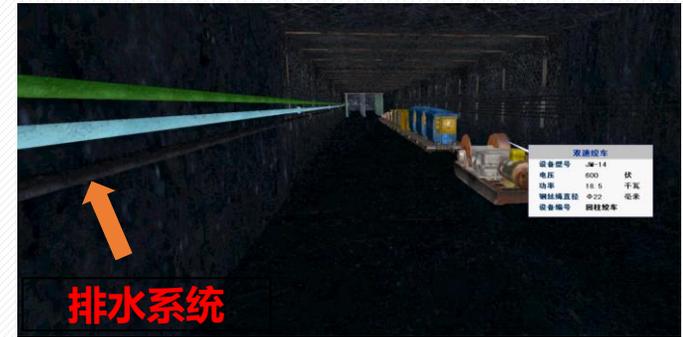
虚拟漫游与实时查询

### 3.3 矿井地质安全保障技术及智能开采管控平台



#### (5) 智能高效管理平台

- 实时监测及预警：实现多源数据的集成化基础与其他数字矿山专业系统进行整合，人员定位，排水，机电，通风，...
- 可视化管理平台：实现地上地下的一体化虚拟、真实再现；超大量场景数据渲染优化显示。采用3D-GIS技术和虚拟仿真技术，实现了矿山三维全息化构建、地表场景再现、地测数据管理、巷道、三维地质模型、设备和生产信息管理等。

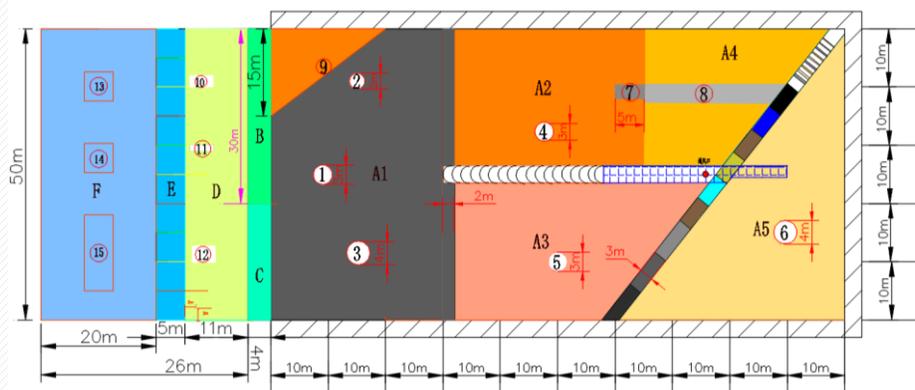


地上地下虚拟漫游与工作面、地质异常区、巷道等集成显示与实时查询

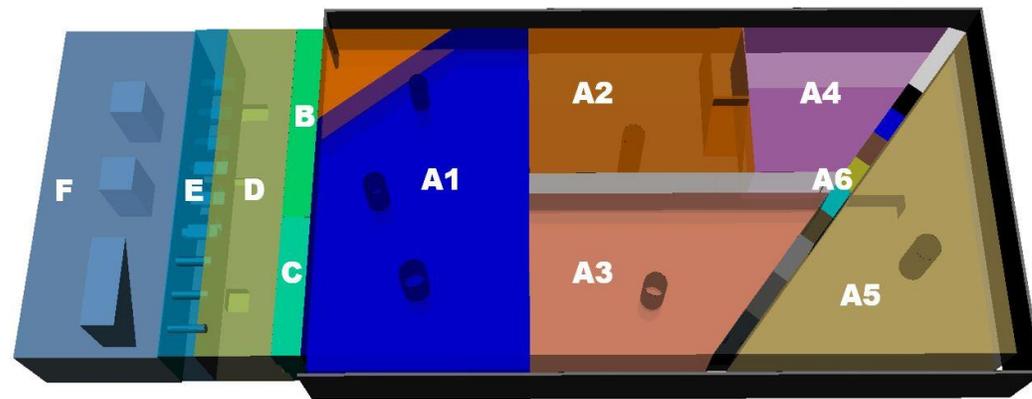
### 3.4 大型矿井地球物理模型



设计建造了世界上首个**1:1大型地球物理模型基地**，长140m，宽50m，高6.2m，实现对地球物探仪器的标定、检测、技术方法研究等工作。



物理模型设计图



物理模型立体图



大型地球物理模型国际研讨会 (2018年)

## 第四部分

# 我国煤矿智能开采 地质保障系统



我国煤矿安全高效开采地质保障下一步发展应围绕以下三个方向：

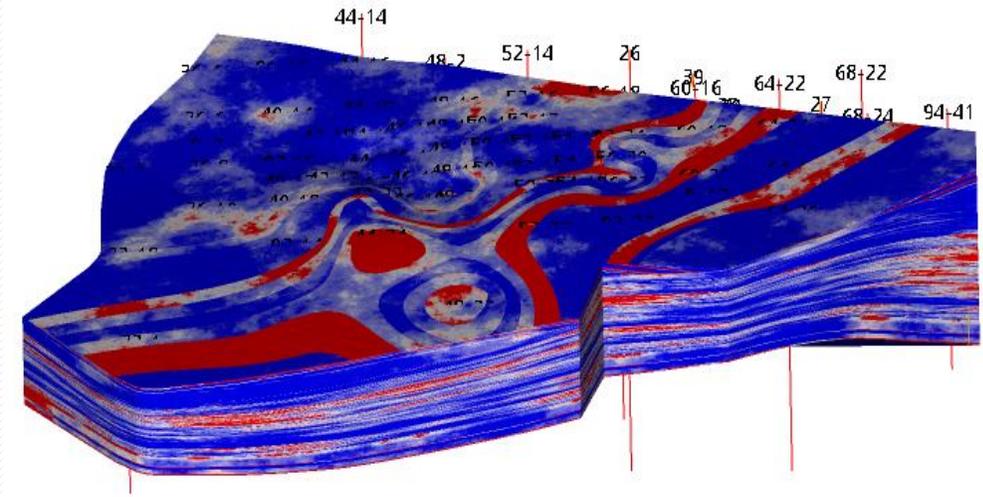
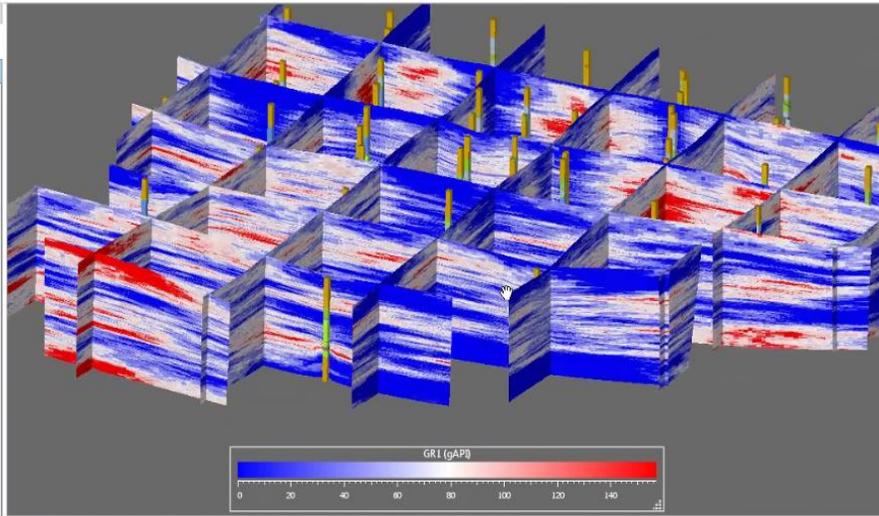
- 在统一的数据融合基础上，进一步提高勘探精度，提高矿井地质的透明化水平，构建煤矿智能开采的地质保障平台。
- 研发与惯导技术一体的高分辨煤岩辨识仪器装备，实现对工作面前方5m范围煤岩结构的精准识别。
- 以岩层结构为基础，以岩石力学和流体因子为重点，开发和建立智能矿山建设决策与灾害隐患预报系统。

## 4.1 提高勘探精度与矿井地质透明化水平



### ➤ 提高地震勘探纵向分辨率

在进行系统的岩石物理分析基础上，通过**垂直地震剖面（VSP）**将地震勘探目的层进行准确的标定，并将地震数据体与测井数据体进行有效融合，利用测井数据纵向分辨率高的优势，将地震勘探的分辨率从过去的**米级提高到分米级左右**，并最终反演成以岩性为基础的三维地质数据体。



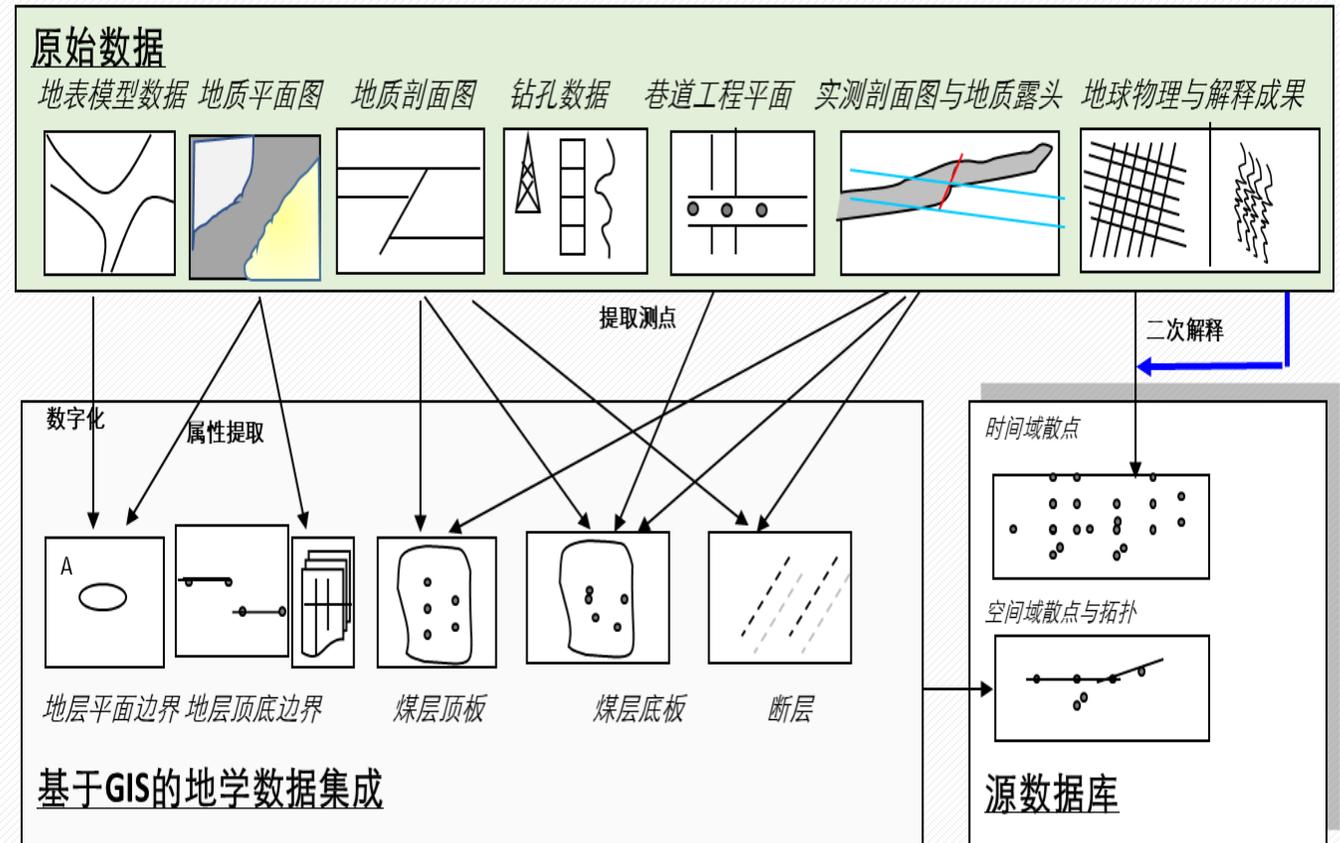
高分辨率、高精度岩性伽马数据体

# 4.1 提高勘探精度与矿井地质透明化水平



## ➤ 矿山多源信息采集

- 实现对钻探信息、物探信息、生产信息等数据的规范化采集，规范化表达和动态维护。
- 尤其是针对三维地震和物探资料的原始和解释成果的管理。
- 集成安全监测监控等采集的数据，根据信息化的标准要求，实现统一标准、统一存储、统一管理，实现最大程度的数据共享。

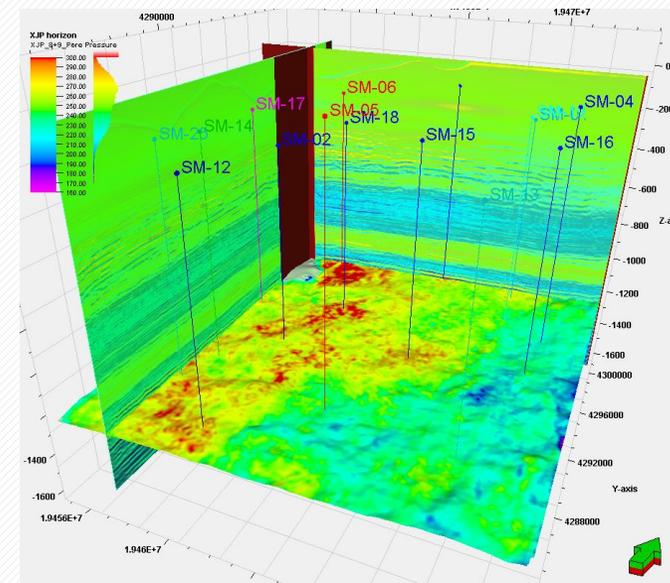
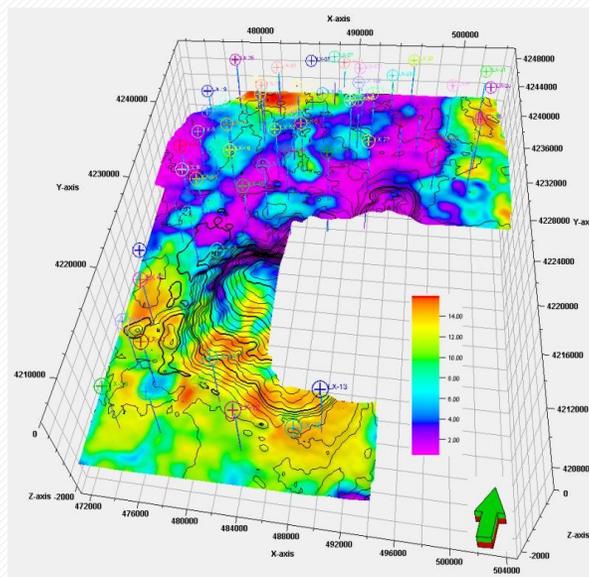
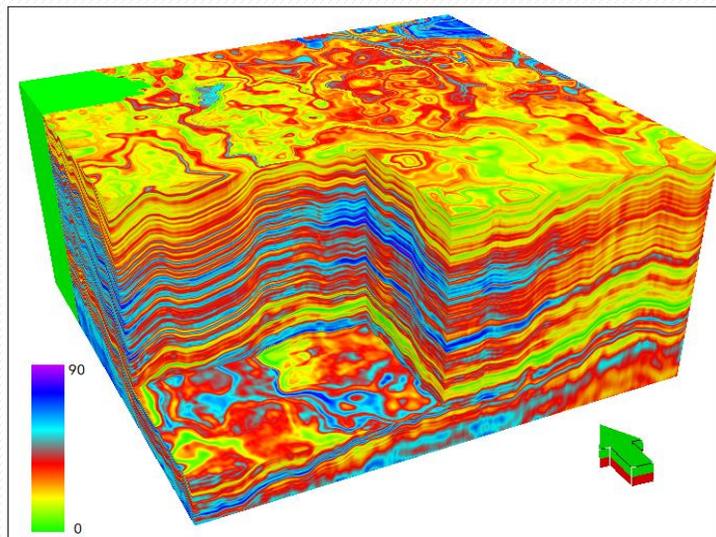


## 4.1 提高勘探精度与矿井地质透明化水平



### ➤ 矿山多源数据融合

矿井地质和矿井物探结果也要通过数据融合方法形成统一的数据结构，以提高矿井地质成果的精度与透明度水平，构建煤矿智能开采的地质保障平台，解决地质系统与采矿工程系统两张皮的问题，**实现矿井地质与采矿工程的无缝对接。**



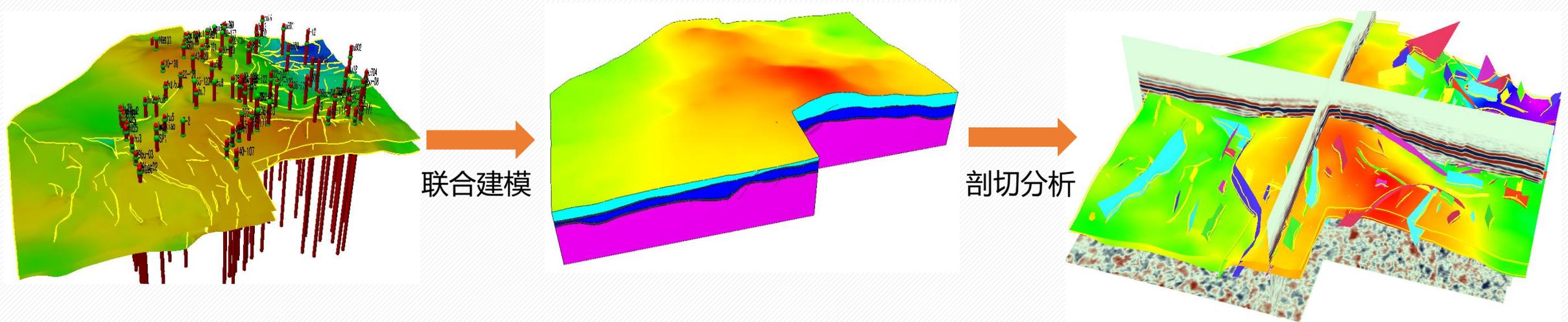
多源数据多分辨率网格融合，建立矢量栅格一体化模型

## 4.1 提高勘探精度与矿井地质透明化水平



### ➤ 矿山地学数据模型构建

利用钻探、测井以及三维地震等发挥各种地学数据的精度优势，构建并动态修正**高精度透明化地质模型**，以反映矿体的最新几何和属性分布状态；精细描述断层等地质构造、陷落柱、采空区、老窑等。

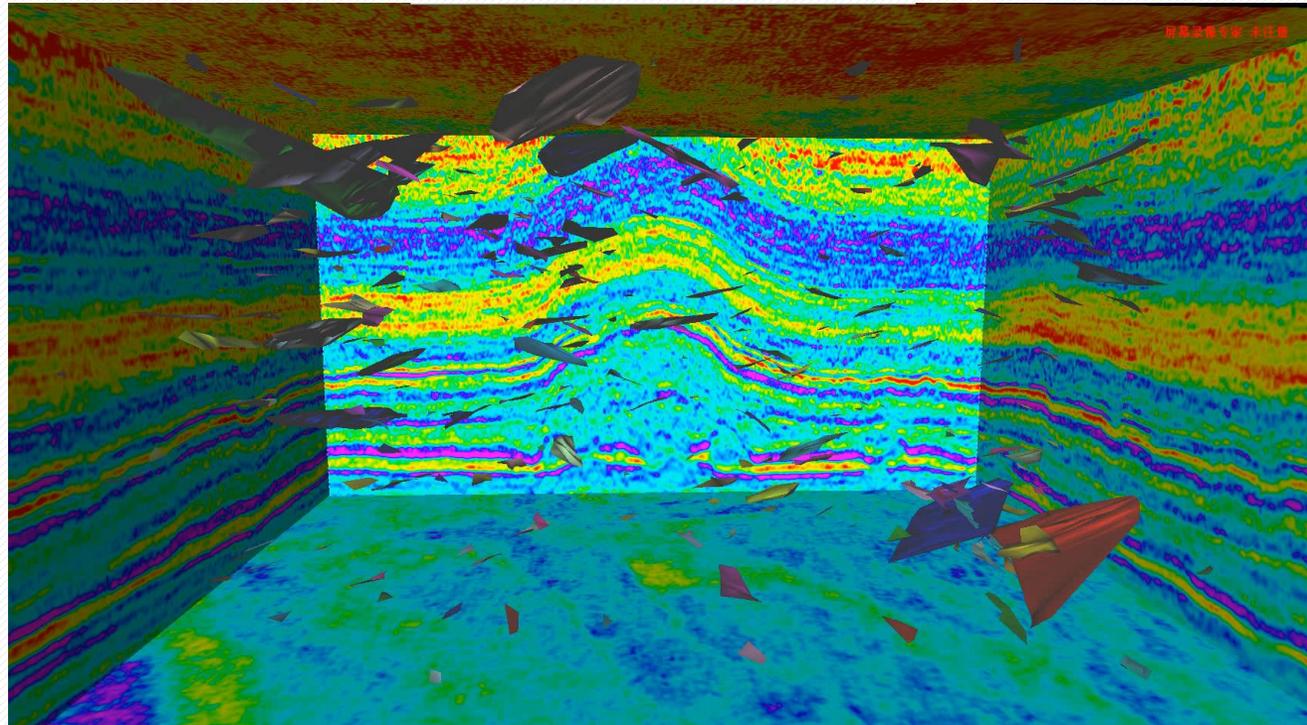


## 4.1 提高勘探精度与矿井地质透明化水平



### ➤ 矿山地学数据模型构建

开展地震数据体场景仿真研究，将三维地震解释数据体、钻探以及测井等资料时深匹配，使得管理和技术人员置身于虚拟现实的地震三维体数据中，实现虚拟现实和三维仿真。

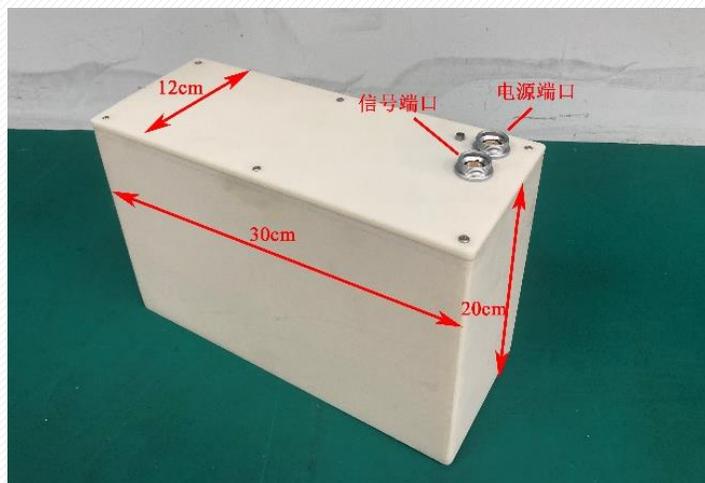


## 4.2 研发高分辨率煤岩辨识仪器装备

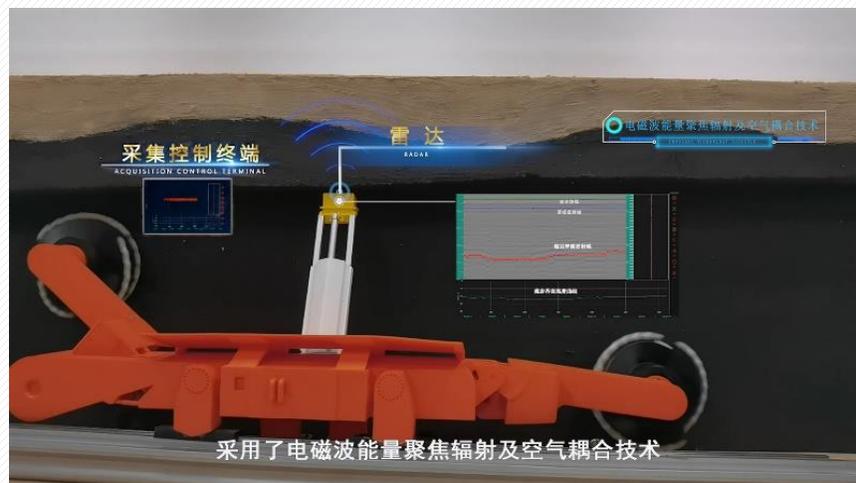


### ➤ 高分辨煤岩辨识地质雷达仪器研制

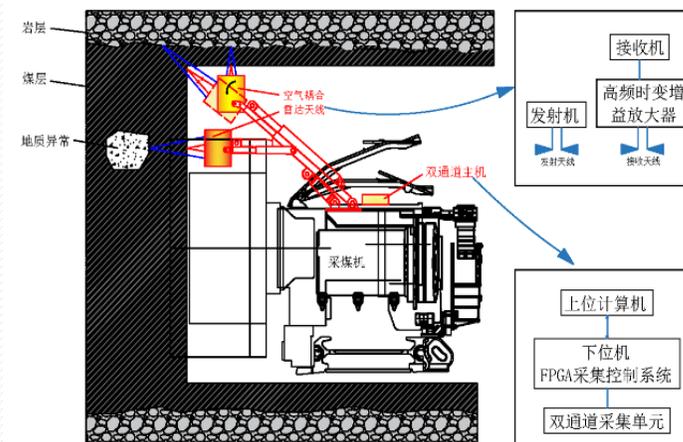
针对当前煤岩分界技术探测精度低、探测距离小的问题，**地质雷达可能是煤岩界面分辨最有潜力的仪器装备**。重点需要突破矿井防爆屏蔽空气耦合天线、煤岩智能识别等关键技术。



防爆屏蔽空气耦合天线



矿井煤岩智能探测系统示意图



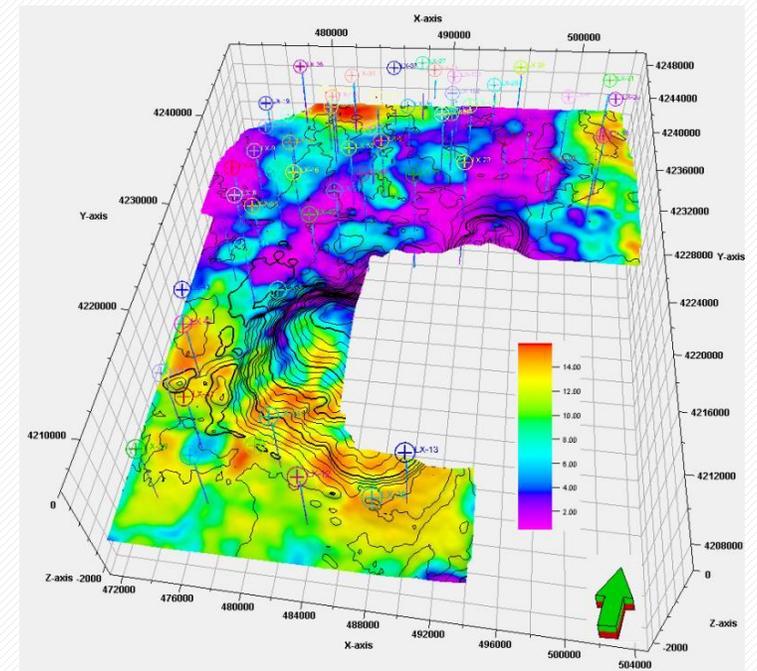
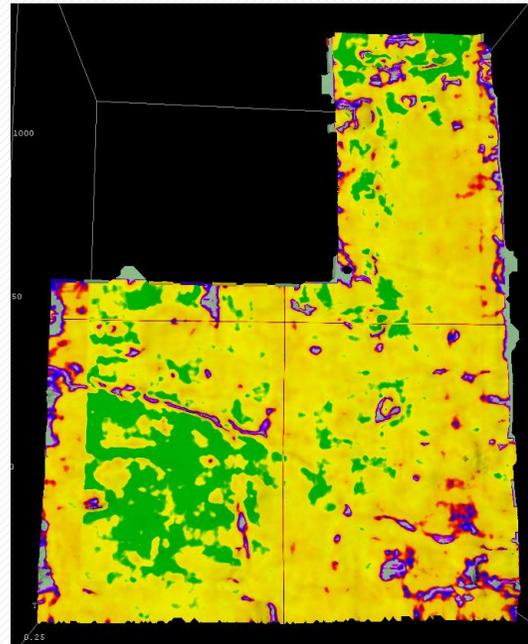
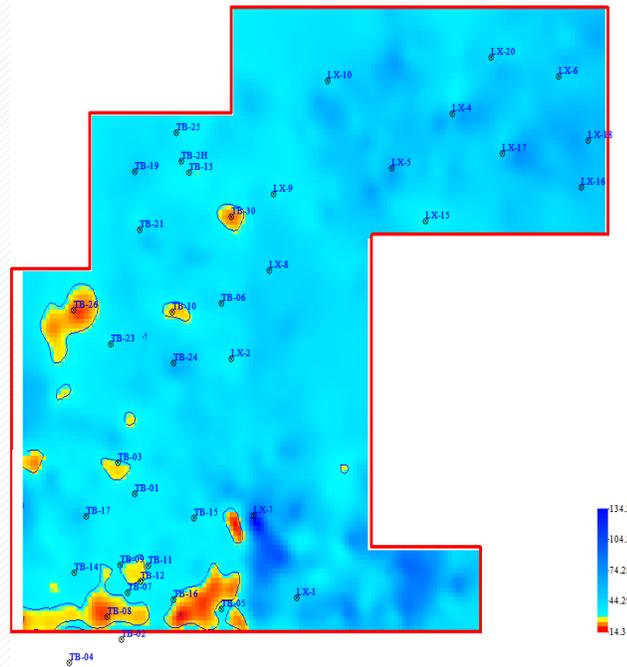
结构图

## 4.3 开发和建立智能矿山建设决策与灾害隐患预报系统



### ➤ 基于高分辨率三维地震技术的矿区岩性及地应力场分布研究

煤矿高分辨三维地震勘探技术是构建智能开采矿井地质保障系统、提高地质透明化最重要的技术之一。由于三维地震勘探是弹性波勘探，可进一步分析和提取岩石物理和流体识别相关的属性。通过约束反演，以获取矿区内岩性及地应力场的状况，为智能开采支架选型和动力灾害预防提供科学依据。

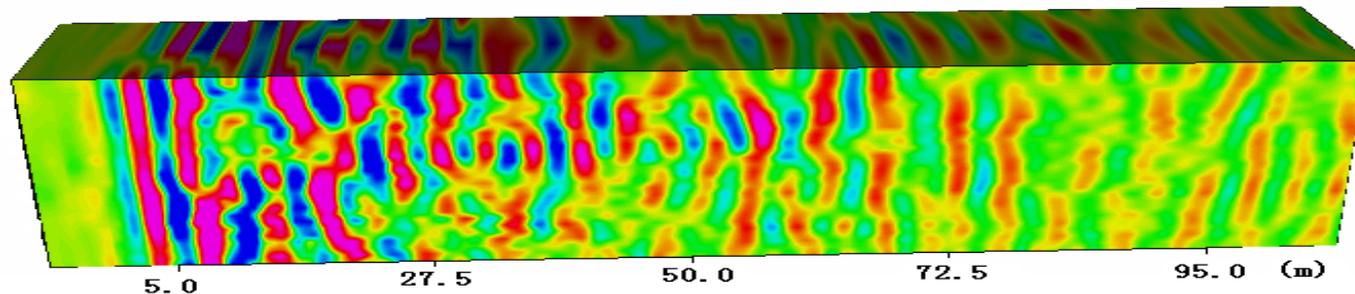


## 4.3 开发和建立智能矿山建设决策与灾害隐患预报系统

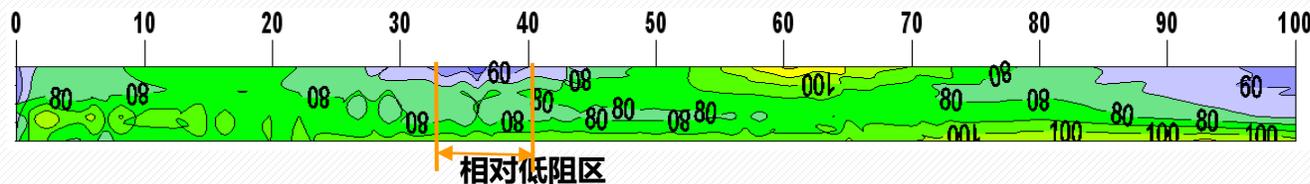


### ➤ 隐蔽动力灾害源智能识别与预警

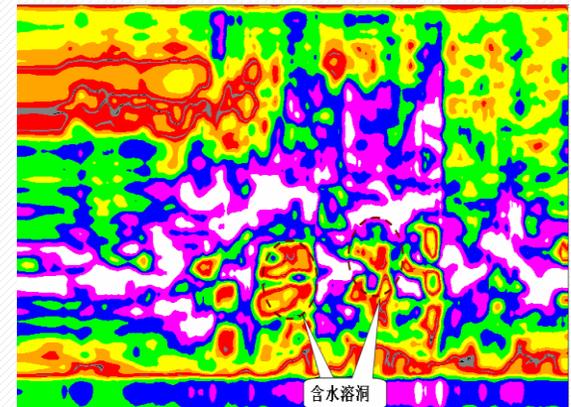
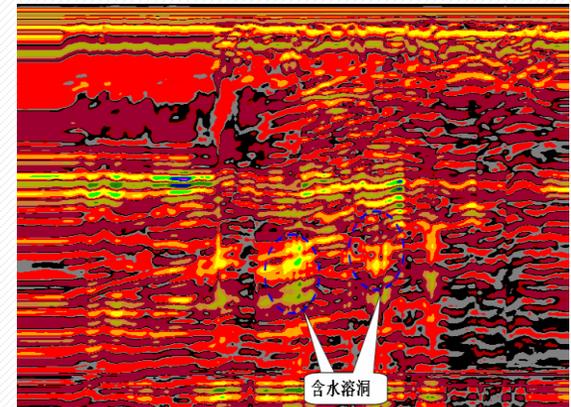
确定隐蔽动力灾害源发生的条件和过程与物理场响应的耦合关系，建立水、火、瓦斯灾害精准预测评价模型，实现智能识别与预警，是以智能开采为目标的矿井地质保障系统亟待解决的重要问题。



地震探测



瞬变电磁探测



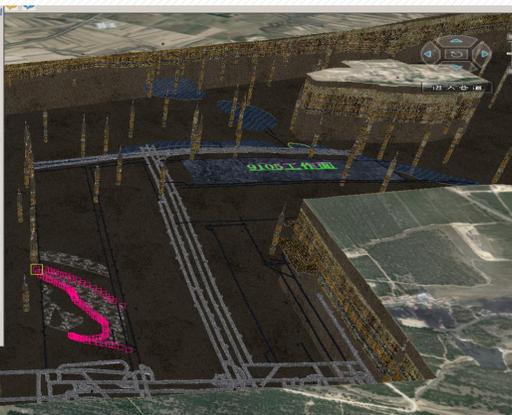
探地雷达探测

# 4.3 开发和建立智能矿山建设决策与灾害隐患预报系统



## ➤ 建立矿山智能高效管理平台

建立可视化管理平台：实现地上地下的一体化虚拟、真实再现；超大量场景数据渲染优化显示。采用3D-GIS技术和虚拟仿真技术，实现了矿山三维全息化构建、地表场景再现、地测数据管理、巷道、三维地质模型、设备和生产信息管理等。

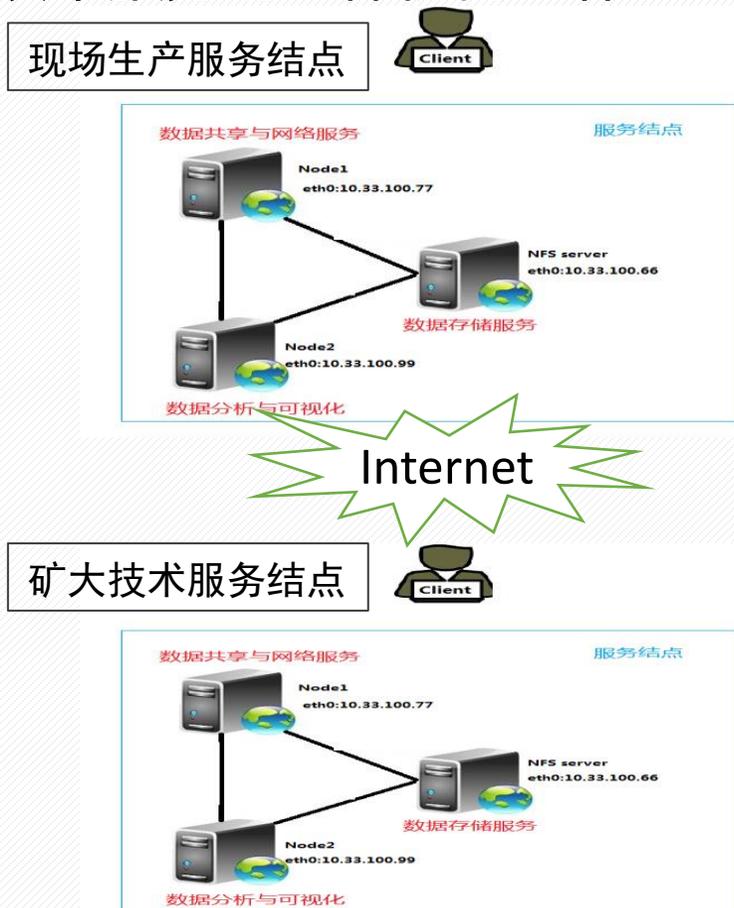


全息化透明煤矿

地上地下虚拟漫游与实时查询



两地部署：实现现场生产和远程技术服务的一体协同工作。

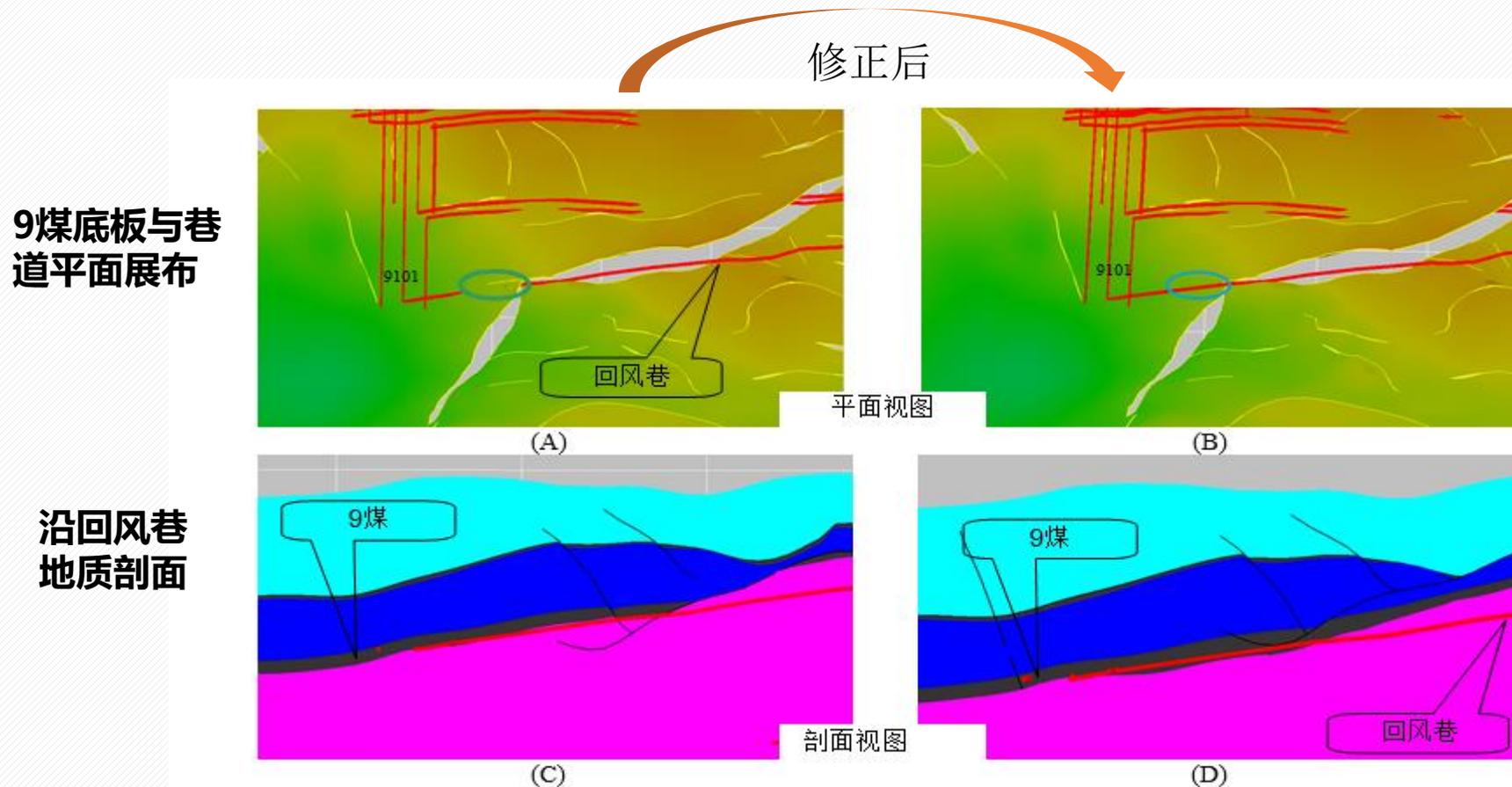


## 4.3 开发和建立智能矿山建设决策与灾害隐患预报系统



### ➤ 建立矿山智能高效管理平台

根据开采过程的井巷地质揭露，**重新修正三维地质模型**，不断提高模型精度，并具备对历史数据的回溯和对比功能，指导井下作业。



## 4.3 开发和建立智能矿山建设决策与灾害隐患预报系统

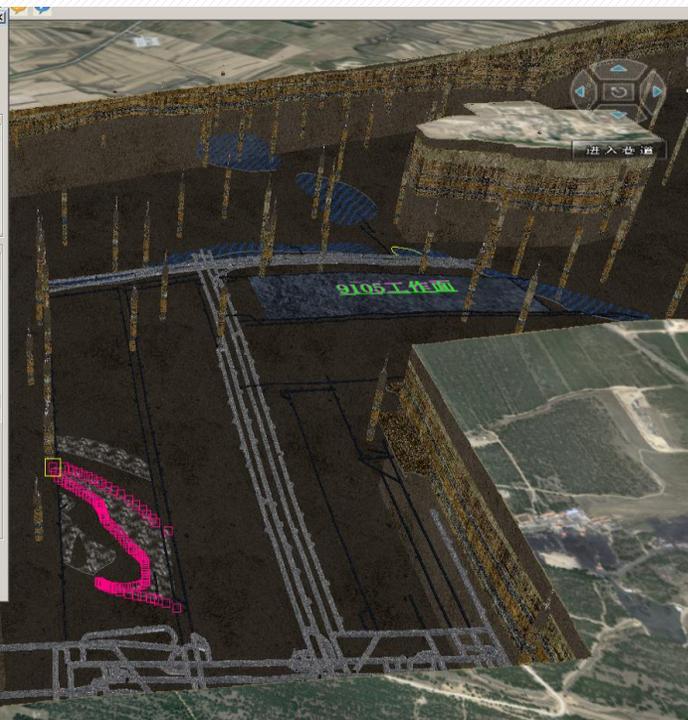
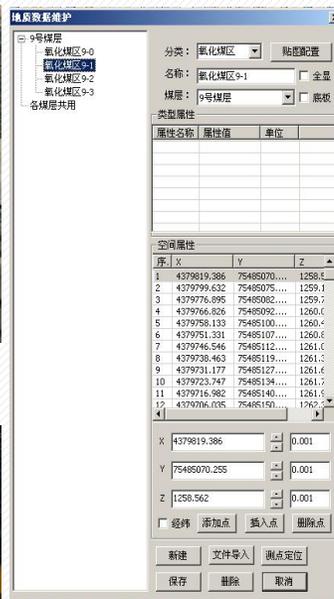
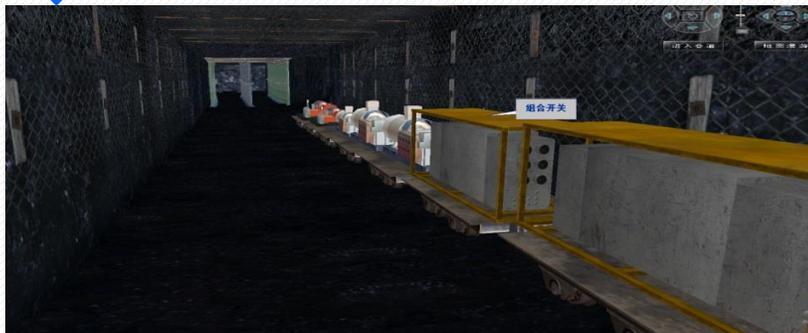


### ➤ 建立矿山智能高效管理平台

实现地上地下一体化虚拟、真实再现，超大量场景数据渲染优化显示。采用3D-GIS技术和虚拟仿真技术，实现矿山三维全息化构建、地表场景再现、地测数据管理、巷道、三维地质模型、设备和生产信息管理等。



地上地下虚拟漫游与实时查询



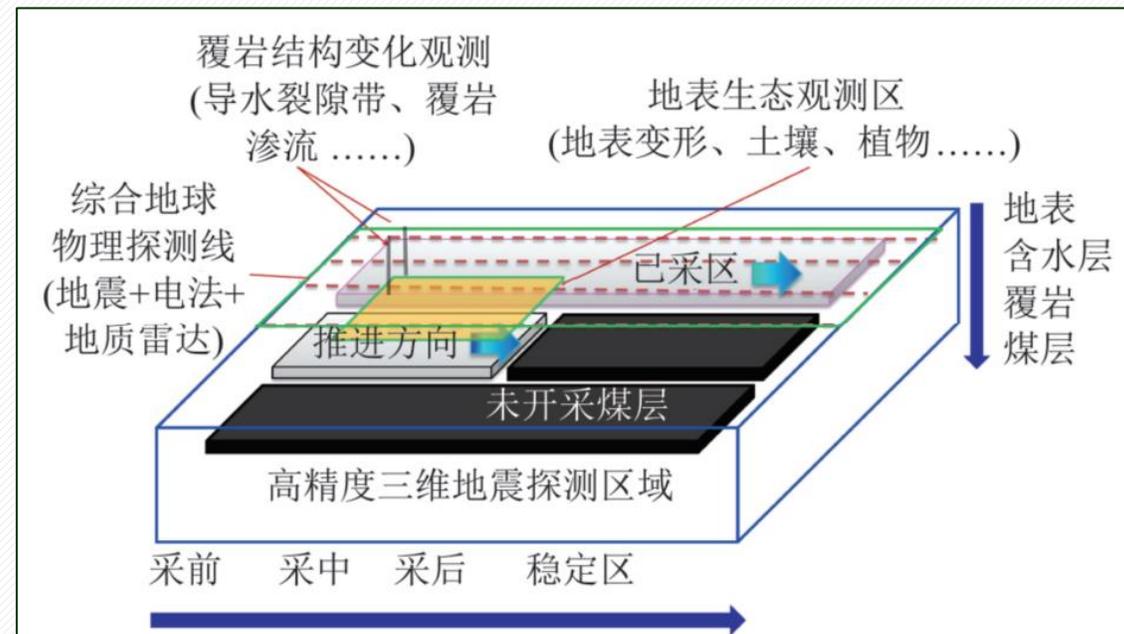
全息化透明煤矿

## 4.3 开发和建立智能矿山建设决策与灾害隐患预报系统



### ➤ 西部矿区生环境与生态修复

煤炭开发主体已从东部转移中西部，西部矿区水资源匮乏、生态脆弱，煤炭开采对水、生态的损伤很大，成为影响该地区煤炭工业发展的重要因素。在采前、采中、采后煤炭开发全生命周期中通过观测和研究厚煤层开采条件下上覆岩层的破断规律及其与水、生态的关系，为该地区的矿区环境与生态修复服务，是今后矿井地质保障系统的重要内容。



## 第五部分

## 结论与展望



- 我国煤田复杂地质构造和煤炭开采机械化需求催生了煤矿安全高效矿井地质保障系统的建立。
- 煤矿高分辨三维地震勘探技术的发展促进了煤矿安全高效矿井地质保障系统建设的成熟。
- 矿井地质透明化是当前煤矿安全高效矿井地质保障系统发展的努力方向。



我国煤矿安全高效开采地质保障系统发展的四十年，也是我国煤炭工业高速发展的四十年，一大批地质工作者为之奋斗，无怨无悔，促进了我国煤炭工业的科技进步。

煤矿安全高效地质保障系统涉及**多领域、多学科**的知识，需要进一步培养和引进**高水平复合型地质、地球物理人才**。研究人员要虚心学习、积极**引入相关学科的先进技术与方法**，**加强国内国际交流合作**，勤于思考，努力创新，促使其不断进步和发展！





**汇报完毕**

**敬请批评指正！**