

探地雷达在隧道质量检测、  
超前预报中的应用分析



主讲人：王恒

2020年4月15日 20:00

# 《隧道施工质量检测雷达应用分析》目录

## 一、探地雷达在衬砌检测中的应用

### 1.1 衬砌无损检测及相关规范、规程

### 1.2 雷达法衬砌检测方案

### 1.3 典型数据

### 1.4 数据分析

## 二、探地雷达在超前预报中的应用

### 2.1 超前预报及相关规范、规程

### 2.2 雷达法超前预报方案

### 2.3 典型数据

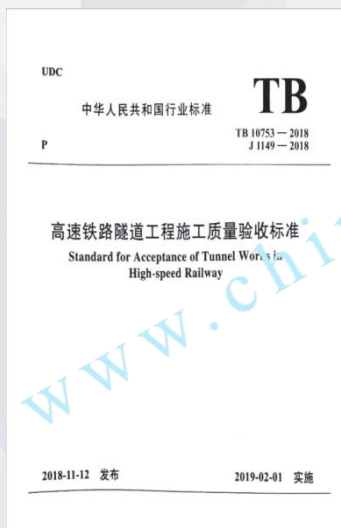
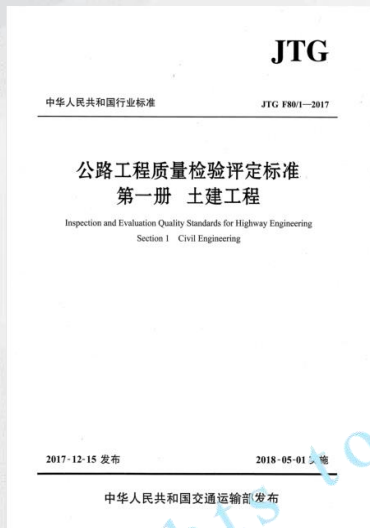
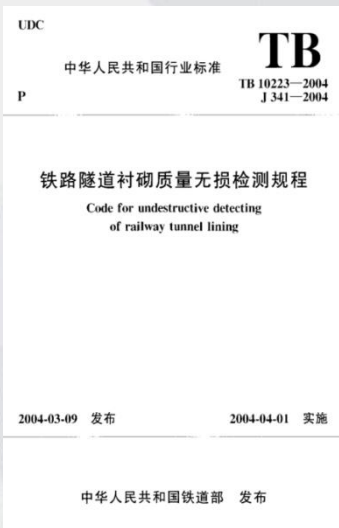
### 2.4 数据分析

## 1.1 衬砌无损检测及相关规范、规程

随着公路建设事业的高速发展，为提高交通运输效率，隧道的建设数量越来越多。作为隧道的主要承重结构与防水结构，隧道衬砌的质量好坏直接影响着隧道的使用性能与寿命。因此，对隧道衬砌质量的检测显得尤为重要。

以损坏隧道衬砌结构为代价的钻芯检测方式已经无法满足目前工程要求，无损检测技术以其快速、连续、高效等优点逐步代替钻芯检测方式，成为目前隧道工程衬砌质量检测的主要手段。

# 1.1 衬砌无损检测及相关规范、规程



参考：铁路隧道衬砌质量无损检测规程（TB 10223-2004）  
公路工程质量检验评定标准（JTG F80/1-2017）  
高速铁路隧道工程施工质量验收标准（TB 10753-2018）  
混凝土中钢筋检测技术标准（JGJ/T 152-2019）  
地质雷达技术实用手册



## 1.1 衬砌无损检测及相关规范、规程

无损检测是在不损坏检测对象、保证检测对象完整性的前提下，通常采用声波、电磁波、红外线、光谱分析等方法对检测对象的结构合理性、材料性能、缺陷等一些列问题进行检测的方法。无损检测在隧道衬砌中，常用于检测衬砌厚度、强度、衬砌背后的回填密实度、内部缺陷和衬砌内部钢架、钢筋等分布。

地质雷达法适用于检测衬砌厚度、衬砌背后的回填密实度、内部缺陷和衬砌内部钢架、钢筋分布等。

声波法包括直达波法和反射波法，应根据不同的检测目的选用。直达波法适用于检测隧道衬砌表层混凝土质量，判定浅部的典型缺陷，在具有参照标准的前提下，可推定衬砌表层混凝土的单轴抗压强度等级；反射波法适用于检测隧道衬砌混凝土厚度、内部缺陷等。衬砌无损检测包括施工过程中的质量控制和工程验收的质量无损检测，检测内容包括衬砌的厚度、强度、背后回填密实度和内部缺陷。

# 《隧道施工质量检测雷达应用分析》目录

## 一、探地雷达在衬砌检测中的应用

### 1.1 衬砌无损检测及相关规范、规程

### 1.2 雷达法衬砌检测方案

### 1.3 典型数据

### 1.4 数据分析

## 二、探地雷达在超前预报中的应用

### 2.1 超前预报及相关规范、规程

### 2.2 雷达法超前预报方案

### 2.3 典型数据

### 2.4 数据分析

## 1.2 雷达法衬砌检测方案

衬砌检测包括前期的准备工作和检测工作，具体有以下几项内容。

### 一、隧道踏勘，检查工作条件

检测前需要对隧道进行踏勘，了解工作条件，保障检测工作能够得以顺利进行。

#### (1)了解隧道高度

量测隧道拱顶到仰拱的高度，为搭建检测台车提供尺寸数据。

(2)用明显标记，按照5m/10m间距在边墙上标明隧道里程或洞身标。

(3)搜集衬砌设计资料和竣工资料，了解设计厚度、钢筋间距、钢架间距以及施工过程中的变更信息。

(4)记录隧道中避车洞、下锚段、电缆位置，统计隧底积水段落，对衬砌表面潮湿或有凝结水珠的部位进行统计，记录已发病害的位置和类型。

(5)制订对可能影响到检测台车行进的障碍物的处理办法。

(6)查明附近是否有对雷达产生影响的电磁干扰源。

(7)运营隧道检测需要明确天窗时间。

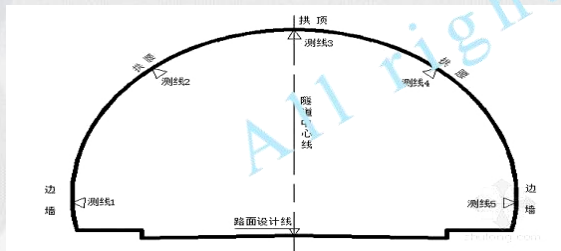
## 1.2 雷达法衬砌检测方案

二、确定测线位置，搭建检测台车  
测线布置以纵向布置为主，横向布置为辅。

隧道施工阶段检测：

单洞两车道隧道应分别在隧道的拱顶、左右拱腰、左右边墙布置共5条测线；  
单洞三车道应在隧道的拱腰部位增加两条测线；遇到支护（衬砌）有缺陷的地方应加密测线

交工验收阶段检测：  
单洞两车道隧道应分别在隧道的拱顶、左右拱腰布置共3条测线；单洞三车道应在隧道的拱腰部位增加两条测线；遇到支护（衬砌）有缺陷的地方应加密测线





## 1.2 雷达法衬砌检测方案

### 三、人员配备

检测人员： 2-3人 负责采集数据、记录数据及现场资料、记录标记里程

指挥人员： 1-2人 负责指挥装载机（路灯车等）师傅，使速度尽可能平稳均匀，保证人员和设备的安全；负责现场的协调调度工作

扶天线人员： 2-3人 保证人员可轮换；拱顶和拱腰测线必须系安全绳，保证人员安全；与扶天线人员交代清楚：天线行进方向、测线的位置、自身安全，天线要求密贴检测面，轮子（如安装）要求正常转动



## 1.2 雷达法衬砌检测方案

### 四、天线频率的选择

深度和分辨率的矛盾,工作时一般优先考虑探测深度

在满足探测深度的基础上选用高分辨率天线

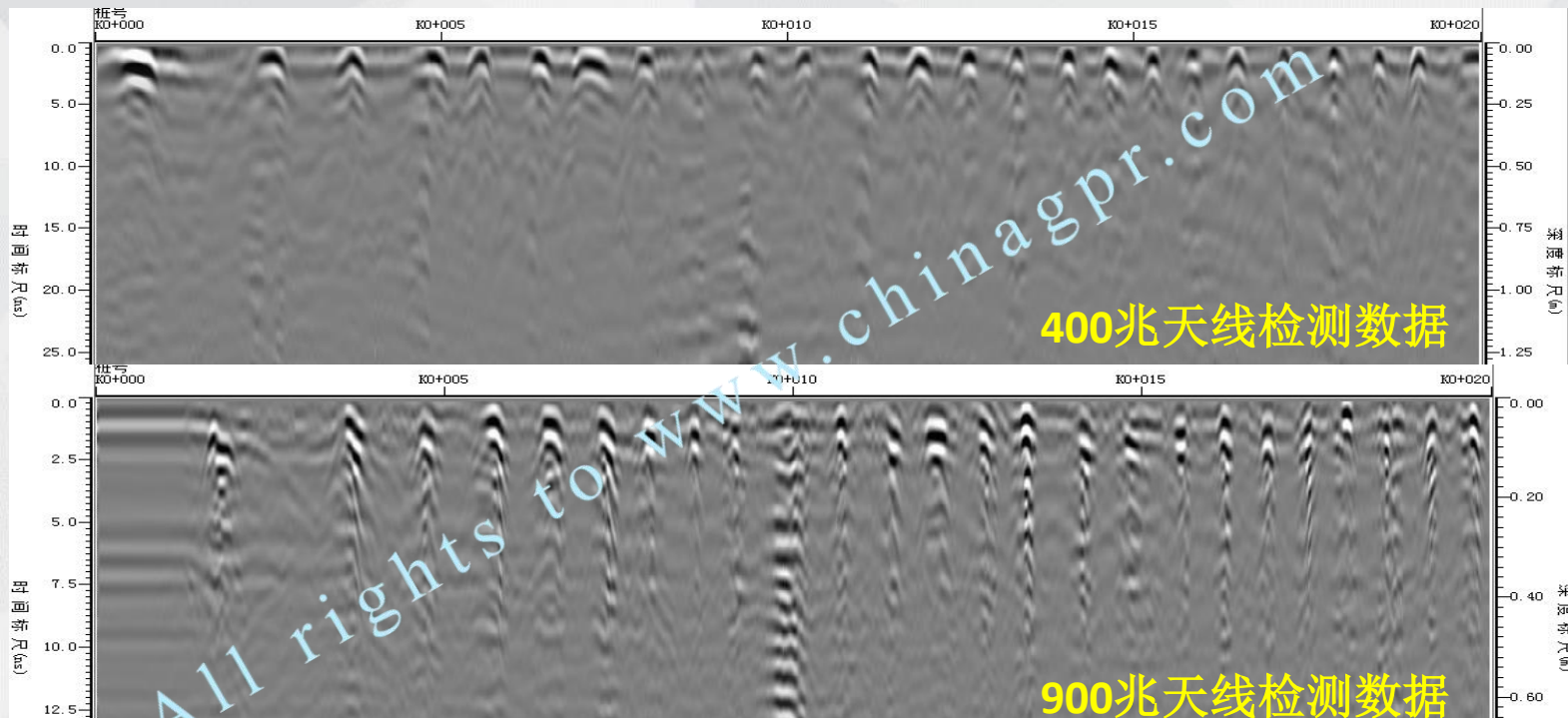


400MHz天线



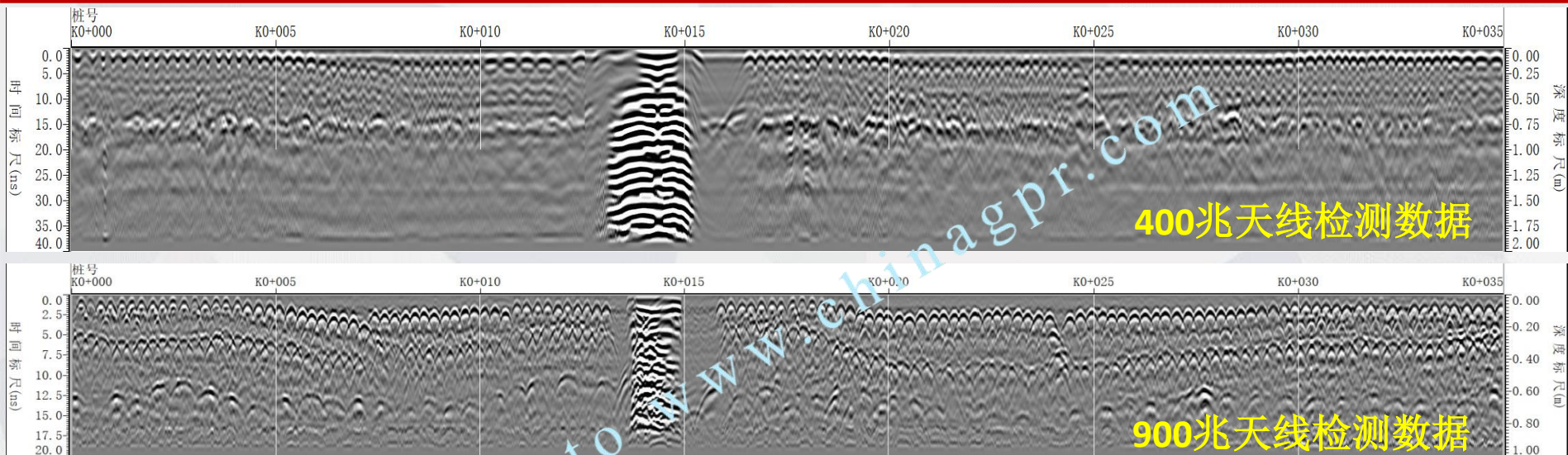
900MHz天线

## 1.2 雷达法衬砌检测方案



云南临沧某项目检测数据

## 1.2 雷达法衬砌检测方案



400兆、900兆均可用来检测初支和二衬，鉴于900兆的分辨率和探测深度（50-70cm），推荐二衬优先使用900兆天线。对于衬砌厚度较大的情况，如三车道的衬砌厚度超过60，甚至达到1米多厚，建议使用400兆天线。

混凝土龄期对探测深度有一定的影响，建议龄期至少30天后进行检测；南方天气潮湿、水分较重，建议龄期两月以后进行检测。一般来说，龄期越久，检测效果越好，半年以后趋于稳定。



## 1.2 雷达法衬砌检测方案

### 五、波速的标定/介电常数的标定

检测前应对衬砌混凝土的介电常数做现场标定：

每座隧道应不少于1处

每处实测不少于3次，取其平均值

当隧道长度大于3km、衬砌材料或含水量变化较大时，应适当增加标定点数

## 1.2 雷达法衬砌检测方案

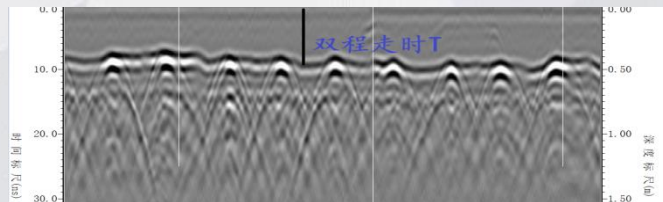
直接法（已知厚度反求速度法）

钻芯法：通过钻芯得到混凝土衬砌厚度或已知目标位置得出距离进行标定；  
标定目标体的厚度不宜小于15cm。

在地质雷达检测的测线上，用钻机在混凝土上钻透衬砌混凝土，然后再用尺量出混凝土衬砌的实际厚度(d)，并从地质雷达图像上读出钻取位置处衬砌混凝土反射层面的双程走时，再根据公式(1)即可求出波速。

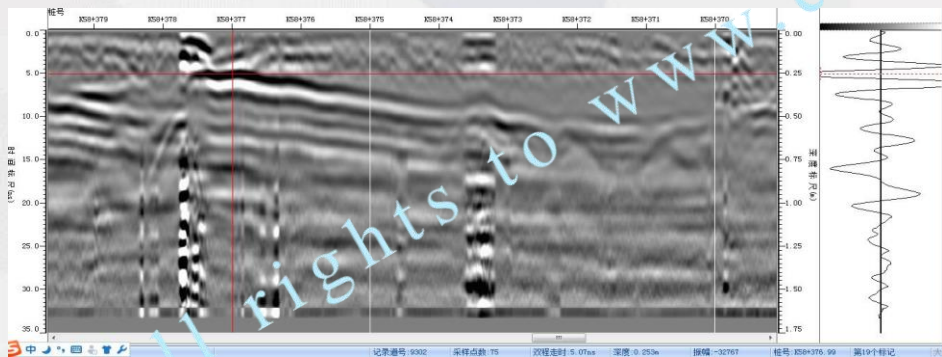
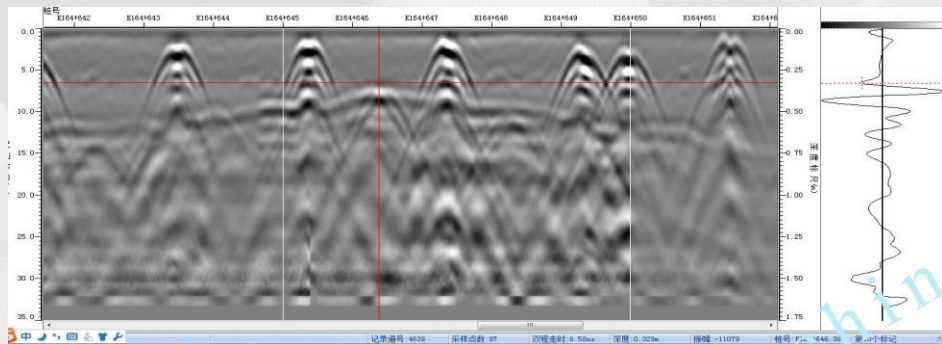
公式 (1)

$$v = \frac{2d}{t}$$





## 1.2 雷达法衬砌检测方案



进行波速标定后，厚度也会存在误差，一般情况下都在3cm以内（1cm左右居多）

云南昭通某项目

## 1.2 雷达法衬砌检测方案

### 六、参数设置

#### LTD-2600主机常用参数

探测方式	频率 (MHz)	扫描速度 (道/秒)	采样点数 (点/道)	时间窗口 (ns)	增益	测距仪型号	取样检测 (cm)
距离模式	400	128/256	512	40-60	自动增益	WDMI-55A	1-2
	900	128/256	512	20-30	自动增益	WDMI-300	1-2
时间模式	400	64/128	512	40-60	自动增益		
	900	64/128	512	20-30	自动增益		

注：增益时需要把天线紧贴检测面，然后选择自动增益，自动增益后在检测面上移动天线，从雷达主机上观察图像上的增益大小是否合适，如需微调可通过分段增益进行调节，建议反复测试几次

## 1.2 雷达法衬砌检测方案

### 七、总结

- 1、检测前应确保设备运行正常
- 2、检测前应准备好检测车辆，在支护（衬砌）表面准确标记隧道里程桩号
- 3、检测时应确保天线与支护（衬砌）表面密贴
- 4、检测时天线移动速度应平稳、均匀，移动速度宜为3~5km/h
- 5、检测记录应包括测线位置、编号、天线移动方向、标记间隔以及天线类型等
- 6、当需要分段检测时，相邻检测段接头重复长度不应小于1m
- 7、应随时记录可能对检测产生电磁影响的物体（如渗水、电缆、铁架及预埋件）及其位置

# 《隧道施工质量检测雷达应用分析》目录

## 一、探地雷达在衬砌检测中的应用

1.1 衬砌无损检测及相关规范、规程

1.2 雷达法衬砌检测方案

**1.3 典型数据**

1.4 数据分析

## 二、探地雷达在超前预报中的应用

2.1 超前预报及相关规范、规程

2.2 雷达法超前预报方案

2.3 典型数据

2.4 数据分析



## 1.3 典型数据

### 主要判断特征

密实：信号幅度较弱，甚至没有界面反射信号；

不密实：衬砌界面的强反射信号同相轴呈绕射弧形，且不连续，较分散；

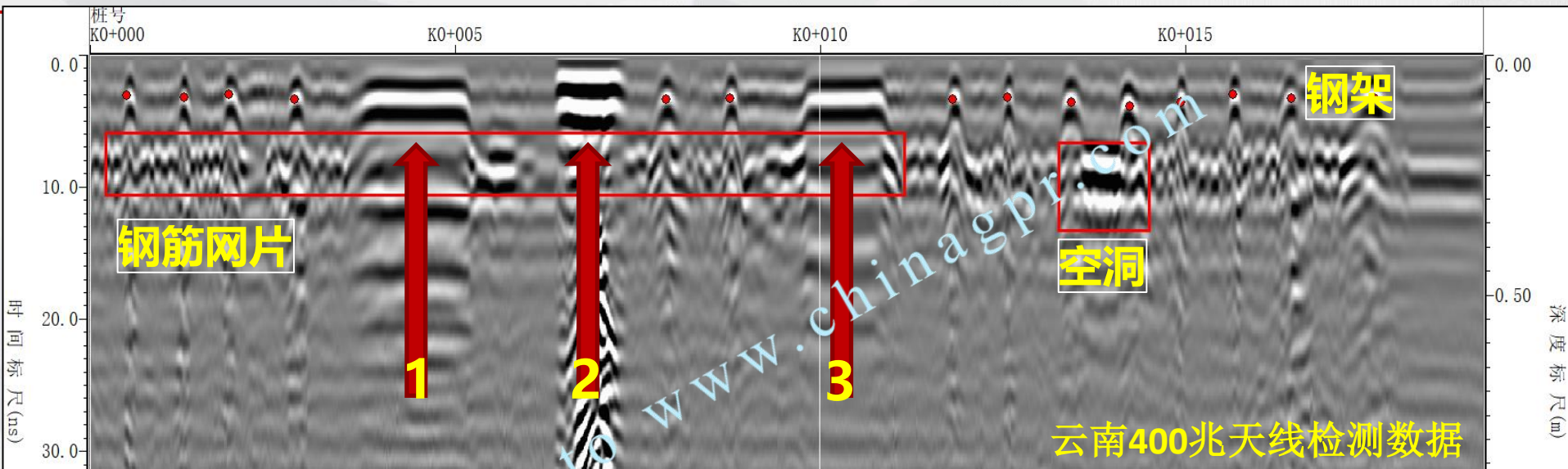
空洞：衬砌界面反射信号强，三振相明显，在其下部仍有强反射界面信号，两组信号时程差较大；

钢架：分散的月牙形强反射信号；

钢筋：连续的小双曲线形反射信号；



## 1.3 典型数据

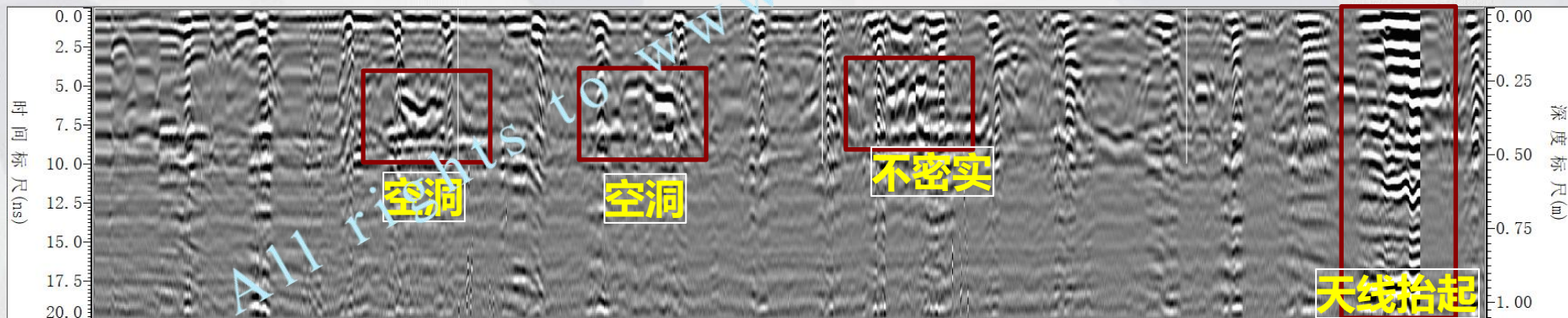
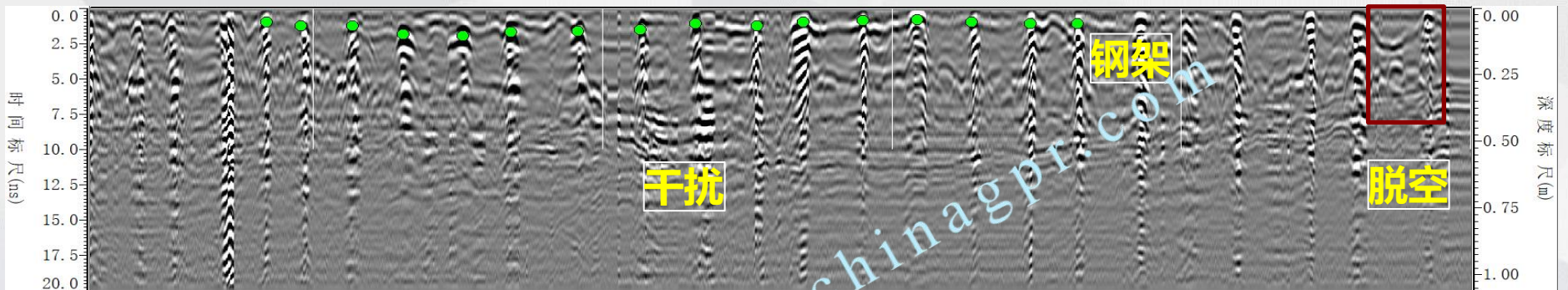


箭头1 时间采集模式下，天线在钢架上短暂未移动（缓慢移动），采集的钢架信号

箭头2 天线未密贴检测面，抬起引起的强反射信号

箭头3 ？？？

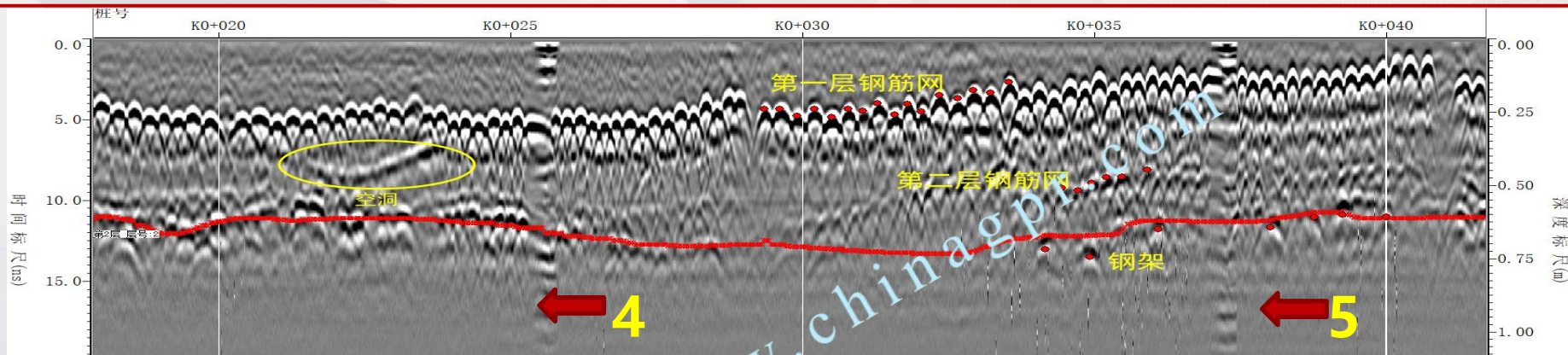
## 1.3 典型数据



900兆初支检测数据



## 1.3 典型数据



第一层钢筋网 连续分布的月牙形信号，可清晰分辨每根钢筋信号

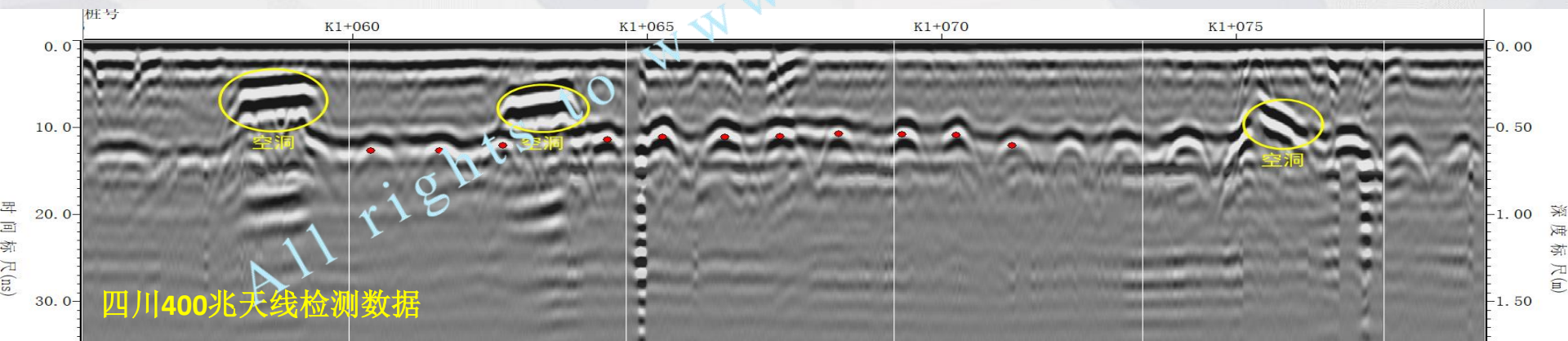
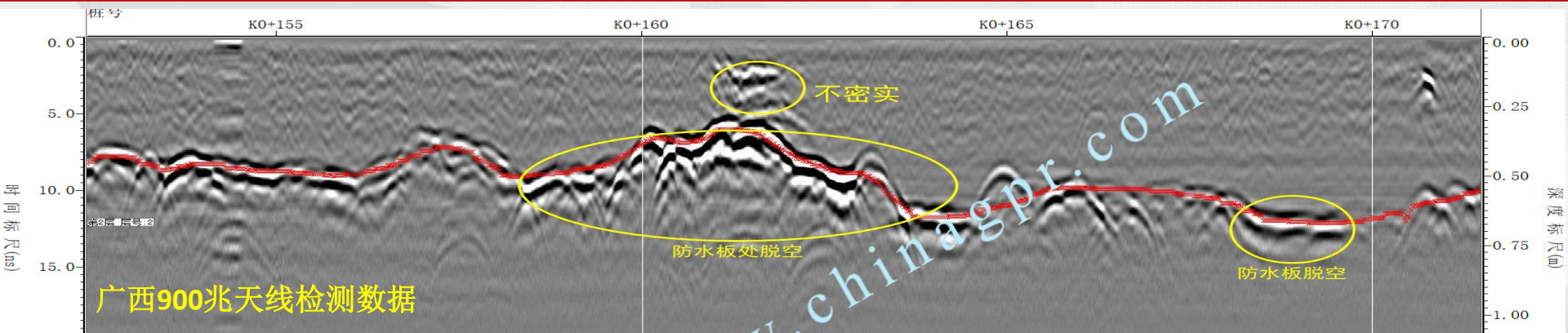
第二层钢筋网 类似网状且分布趋势与第一层钢筋信号不完全一致，由于第一层钢筋网的屏蔽，较难分辨

钢架 钢筋网下分布间距较大的弧形反应，一般较难分辨

空洞（异常） 区别于周围信号（背景信号），空洞较大时会有多次反射信号

箭头4、箭头5 ???

## 1.3 典型数据



# 《隧道施工质量检测雷达应用分析》目录

## 一、探地雷达在衬砌检测中的应用

1.1 衬砌无损检测及相关规范、规程

1.2 雷达法衬砌检测方案

1.3 典型数据

**1.4 数据分析**

## 二、探地雷达在超前预报中的应用

2.1 超前预报及相关规范、规程

2.2 雷达法超前预报方案

2.3 典型数据

2.4 数据分析



## 1.4 数据分析

数据分析注意事项：

- 1、确保位置标记准确、无误
- 2、处理时确保信号不失真，有利于提高信噪比
- 3、分析数据图像，需要了解图像对应的支护参数，参照衬砌的设计参数，按由已知到未知和定性指导定量的原则，对数据中钢筋分布、钢架分布、厚度、缺陷进行判断
- 4、根据现场记录分析可能存在干扰的预埋管件等刚性构件的位置，准确区分支护内部缺陷异常与预埋管件异常；
- 5、拱顶和拱腰任一测线出现缺陷，应留意同里程的拱顶拱腰测线数据并进行分析
- 6、数据图像上多做横向和纵向的对比，找出异常点以及异常特征，提高准确率
- 7、雷达数据解释完后，对有异常的部位应现场钻孔验证

## 1.4 数据分析

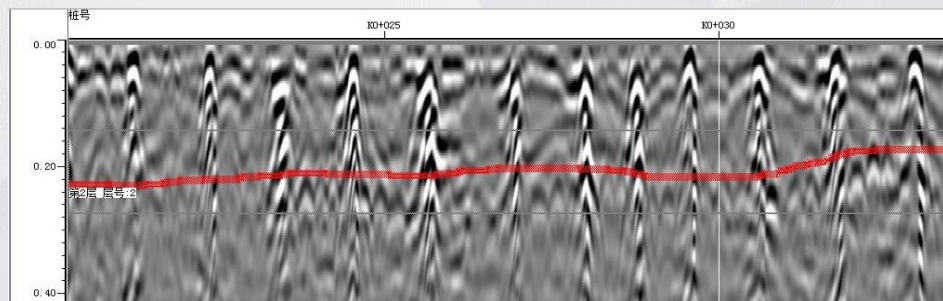
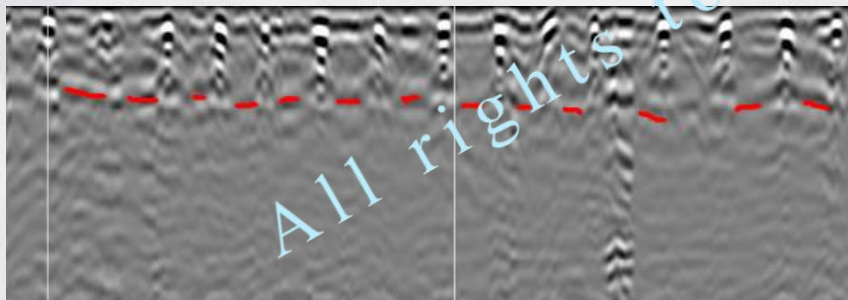
### 初支检测

初支钢架：间距较大、较分散、电磁波信号反射较强

初支钢筋网：间距较小、较密集连续、反射信号相对较弱

初支厚度：在钢拱架之间找层位反射信号；

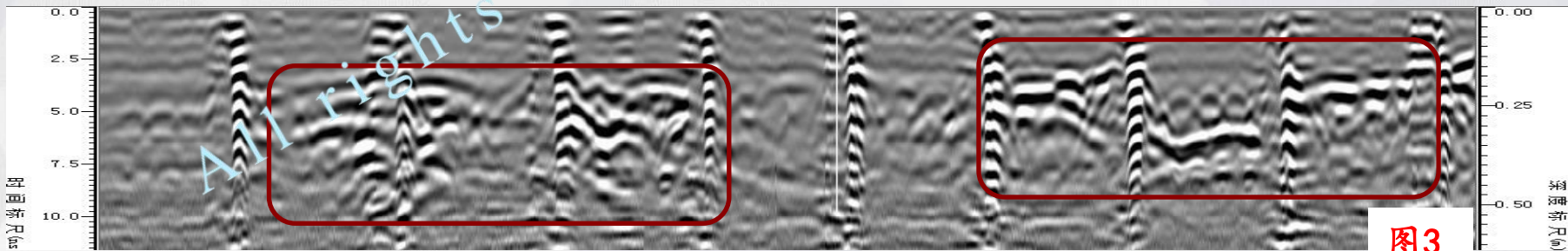
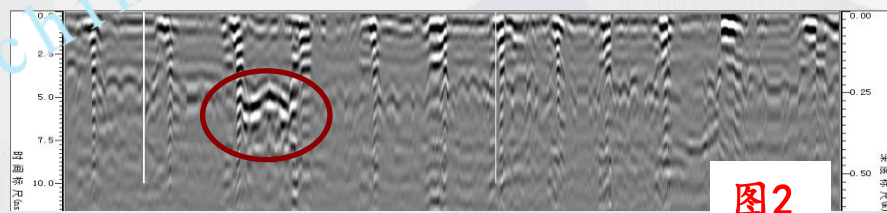
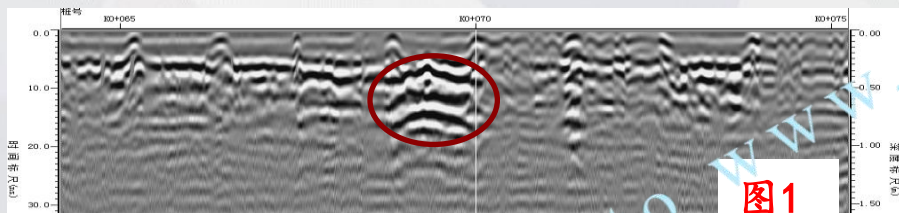
采集效果较好时可根据网片位置来确定混凝土厚度



## 1.4 数据分析

格栅钢架：900MHz检测较好时可看出图像上有两个尖（相对较宽图2、图3）

初支空洞：反射信号强，具有三振相反应特征



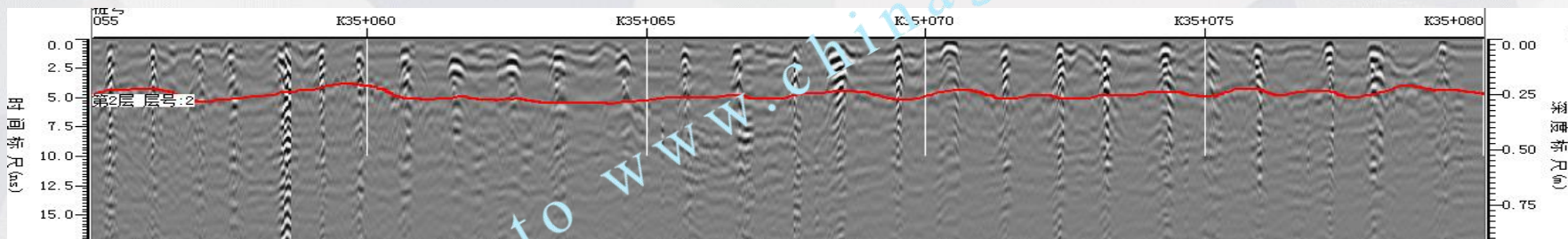


# 1.4 数据分析

厚度要求:

高速铁路: 平均厚度应符合设计设计要求, 检测点数90%及以上不小于设计厚度

公路: 平均厚度 $\geq$ 设计厚度; 60%的检查点的厚度 $\geq$ 设计厚度; 最小厚度 $\geq 0.6$ 设计厚度;  
沿隧道纵向在拱顶、拱腰、边墙连续测量5条线, 每10米检测1个断面, 每个断面测5个点



单点厚度检测概况表

起始桩号	终止桩号	评价长度	实测点数	合格点数	合格率
K35+055	K35+080	5	6	5	83.33%

单点厚度检测明细表

桩号位置	设计厚度 (mm)	实际厚度 (mm)	是否合格
K35+055	230	231	是
K35+060	230	204	否
K35+065	230	266	是
K35+070	230	249	是
K35+075	230	250	是
K35+080	230	237	是

隧道衬砌层厚检测明细表

隧道名称		隧道类型		围岩等级		检测日期		检测方向		检测位置	
起始桩号	终止桩号	评价长度 (m)	设计厚度 (mm)	平均厚度 (mm)	标准差 (mm)	代表值 (mm)	实测点数	合格点数	合格率		
K35+055	K35+060	5	230	232	22	231	600	271	45.17%		
K35+060	K35+065	5	230	262	17	261	600	554	92.33%		
K35+065	K35+070	5	230	248	11	247	600	528	88.00%		
K35+070	K35+075	5	230	242	11	242	600	523	87.17%		
K35+075	K35+080	5	230	229	13	228	600	254	42.33%		
<b>K35+055</b>	<b>K35+080</b>	<b>25</b>	<b>230</b>	<b>243</b>	<b>15</b>	<b>242</b>	<b>3000</b>	<b>2130</b>	<b>71.00%</b>		

## 1.4 数据分析

### 素混凝土二衬

空洞：衬砌界面反射信号强，呈带状长条形或三角形分布，三振相明显，通常有  
多次反射信号

厚度：以钢架信号或衬砌反射界面信号为准



图4

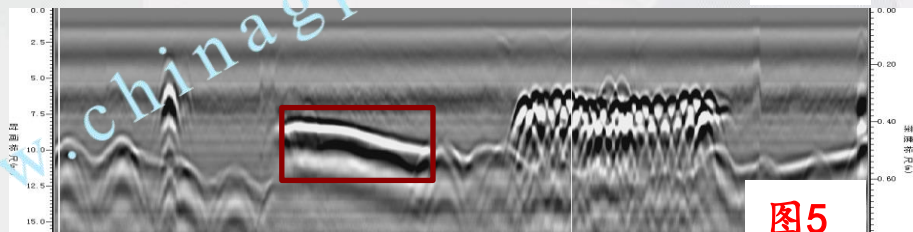


图5

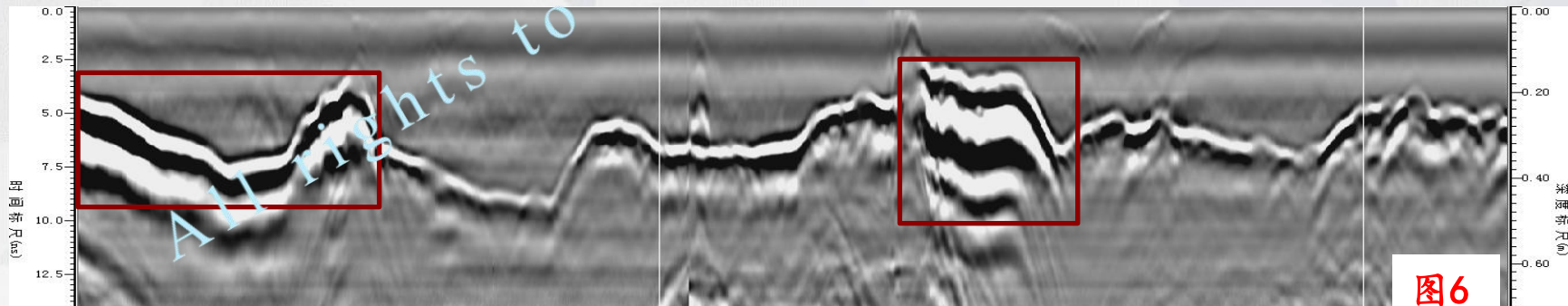
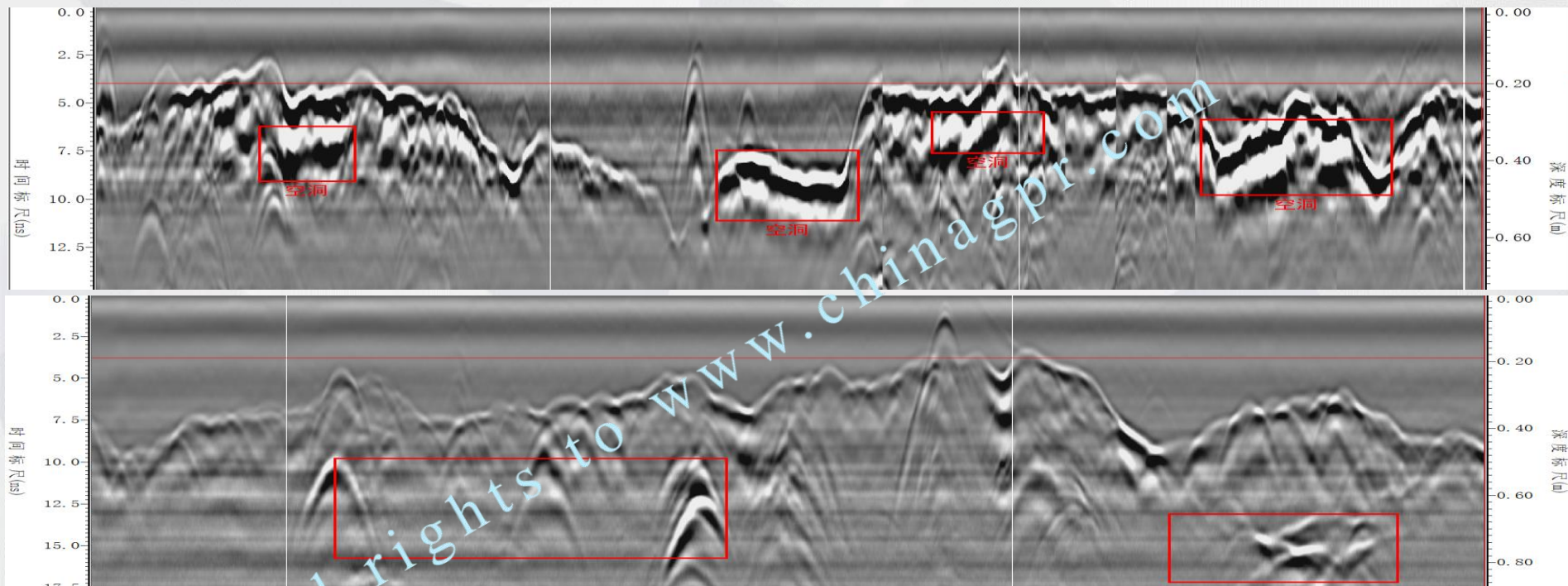


图6



## 1.4 数据分析



厚度不足是衬砌中的红线问题，一定不能忽视  
二衬背后 初支和围岩内缺陷较难处理  
空洞相对好处理，通过注浆可解决问题

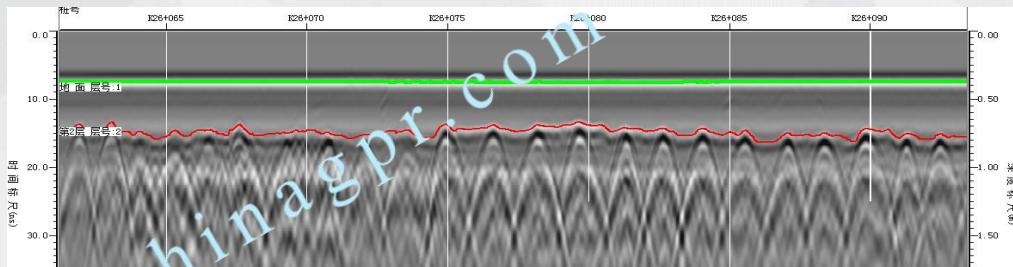
# 1.4 数据分析

厚度要求:

高速铁路: 混凝土实体厚度应符合设计要求

普铁铁路: 衬砌混凝土厚度检查点相对误差小于15%为合格; 合格的检查点数量大于90%的总检查点数量

公路: 90%的检查点的厚度  $\geq$  设计厚度, 且最小厚度  $\geq 0.5$  设计厚度; 沿隧道纵向在拱顶、拱腰、边墙连续测量5条线, 每20米检测1个断面, 每个断面测5个点



单点厚度检测概况表

起始桩号	终止桩号	评价长度	实测点数	合格点数	合格率
K26+035	K26+095	5	13	5	38.46%

单点厚度检测明细表

桩号位置	设计厚度 (mm)	实测厚度 (mm)	是否合格
K26+035	400	329	否
K26+040	400	455	是
K26+045	400	475	是
K26+050	400	406	是
K26+055	400	328	否
K26+060	400	382	否
K26+065	400	411	是
K26+070	400	397	否
K26+075	400	313	否
K26+080	400	313	否
K26+085	400	367	否
K26+090	400	352	否
K26+095	400	401	是

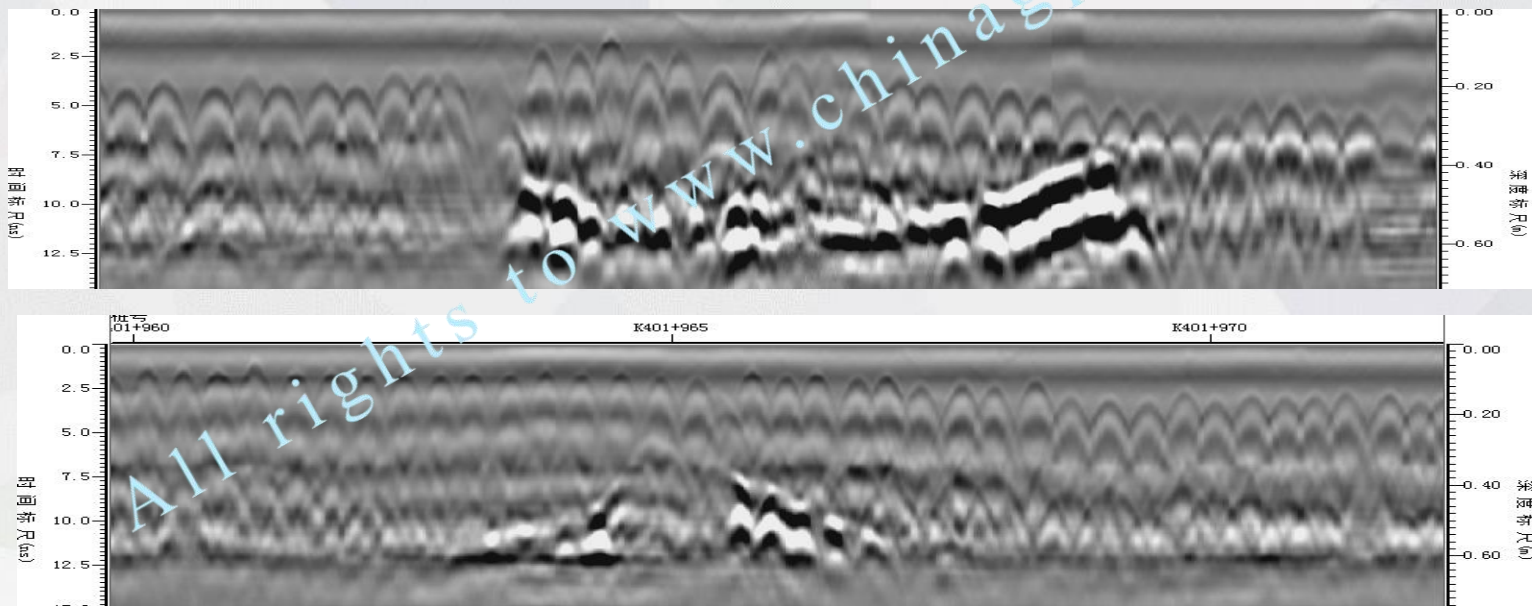
隧道衬砌层厚检测明细表

隧道名称	隧道类型	衬砌层厚	衬砌层厚	衬砌层厚	衬砌层厚	衬砌层厚	衬砌层厚	衬砌层厚	衬砌层厚
检测日期	检测方向	检测位置	检测位置	检测位置	检测位置	检测位置	检测位置	检测位置	检测位置
起始桩号	终止桩号	评价长度 (m)	设计厚度 (mm)	平均厚度 (mm)	标准差 (mm)	代表值 (mm)	实测点数	合格点数	合格率
K26+035	K26+040	5	400	419	32	417	400	387	96.75%
K26+040	K26+045	5	400	483	28	480	400	400	100.00%
K26+045	K26+050	5	400	464	25	462	400	399	99.75%
K26+050	K26+055	5	400	400	38	397	400	326	81.50%
K26+055	K26+060	5	400	366	23	364	400	131	32.75%
K26+060	K26+065	5	400	391	34	388	400	294	73.50%
K26+065	K26+070	5	400	409	22	408	400	377	94.25%
K26+070	K26+075	5	400	420	28	417	400	377	94.25%
K26+075	K26+080	5	400	364	20	362	400	171	42.75%
K26+080	K26+085	5	400	390	25	388	400	332	83.00%
K26+085	K26+090	5	400	440	32	437	400	400	100.00%
K26+090	K26+095	5	400	433	22	431	400	400	100.00%
K26+035	K26+095	60	400	415	27	413	4800	3994	83.21%

## 1.4 数据分析

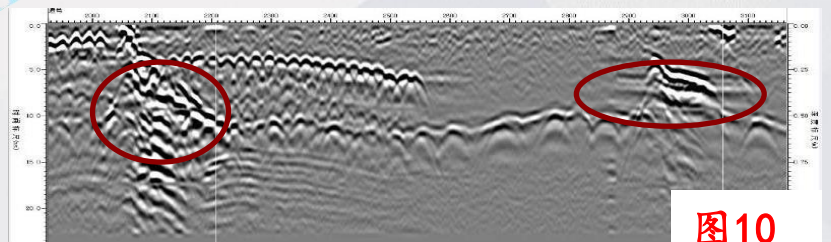
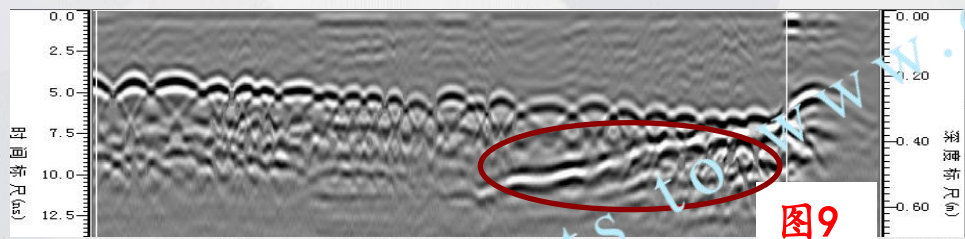
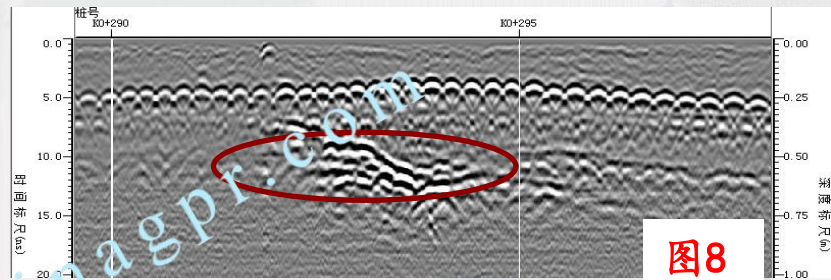
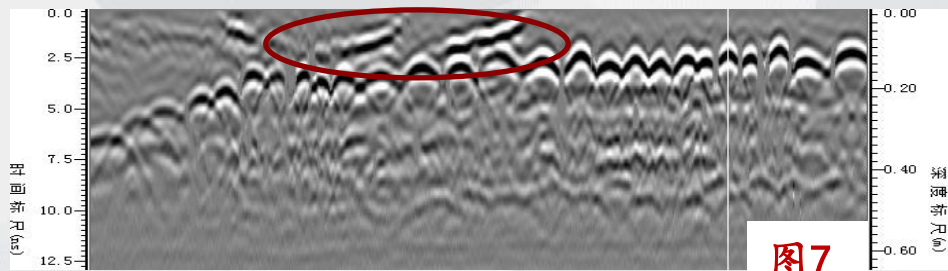
### 钢筋混凝土二衬

空洞：多呈现三角形、长条形特征，反射信号较强





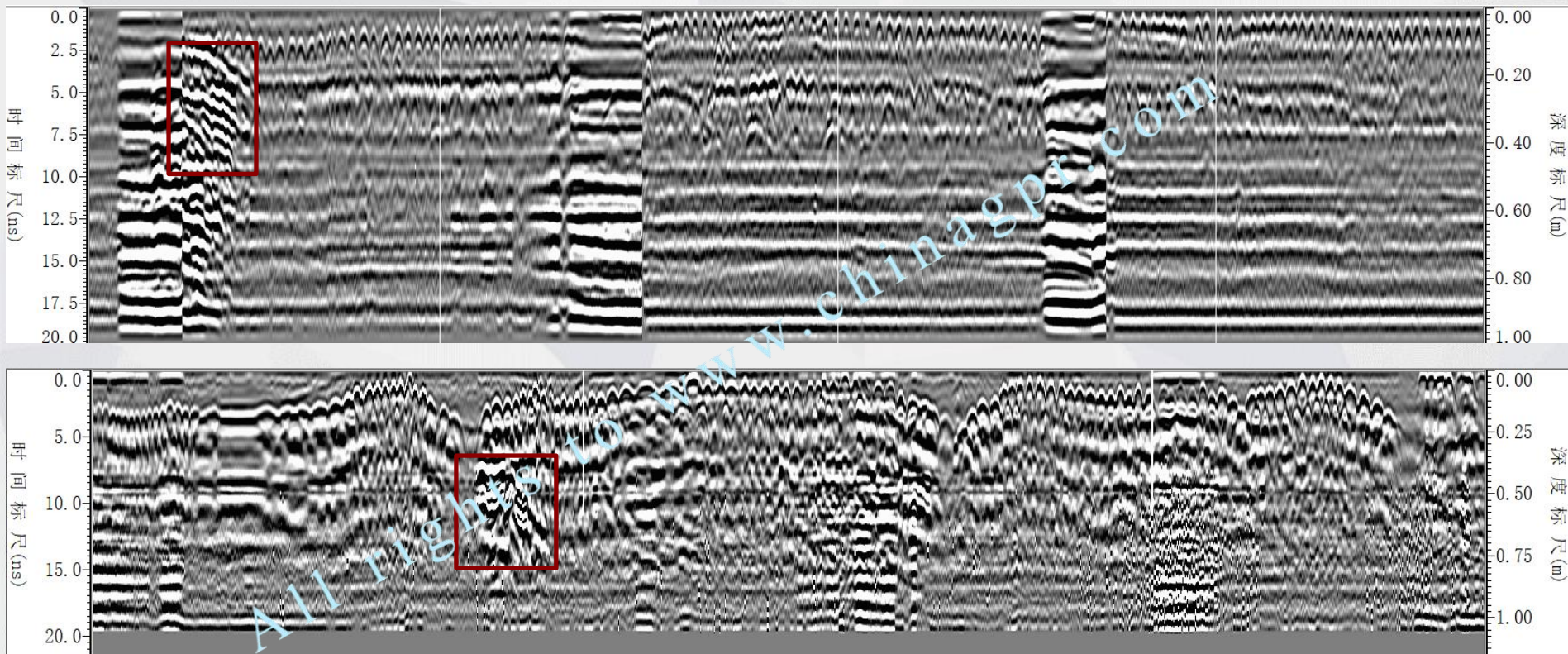
## 1.4 数据分析



数据图像上多做横纵向的对比，找出异常反应，类似图中区域化的连续强反应，均为空洞反应

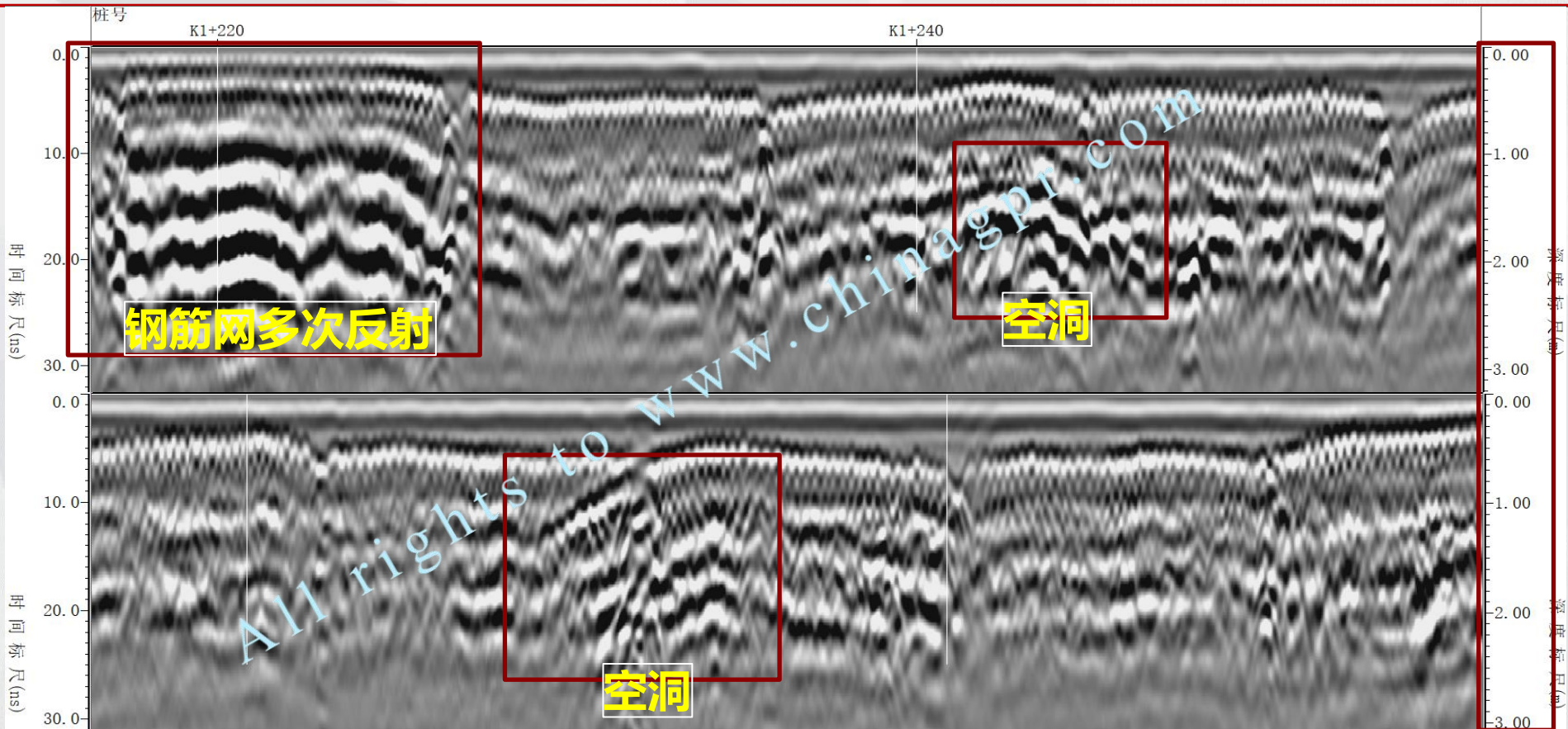


## 1.4 数据分析



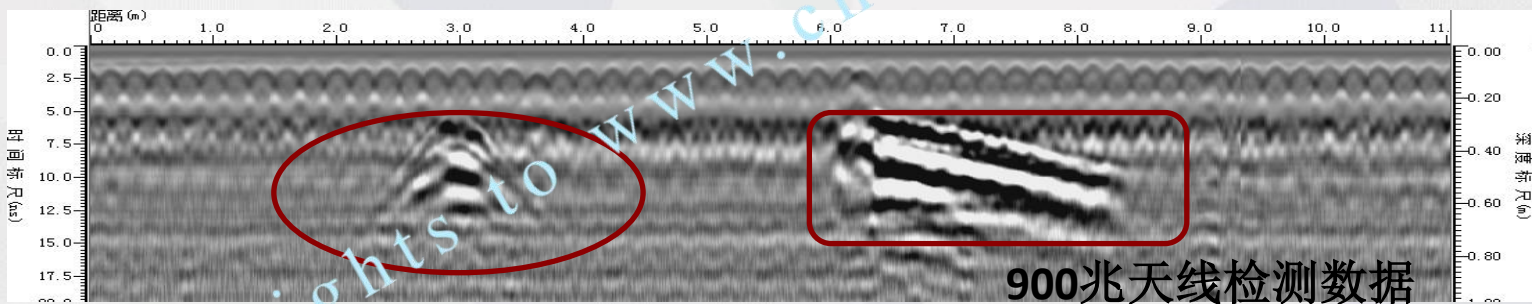
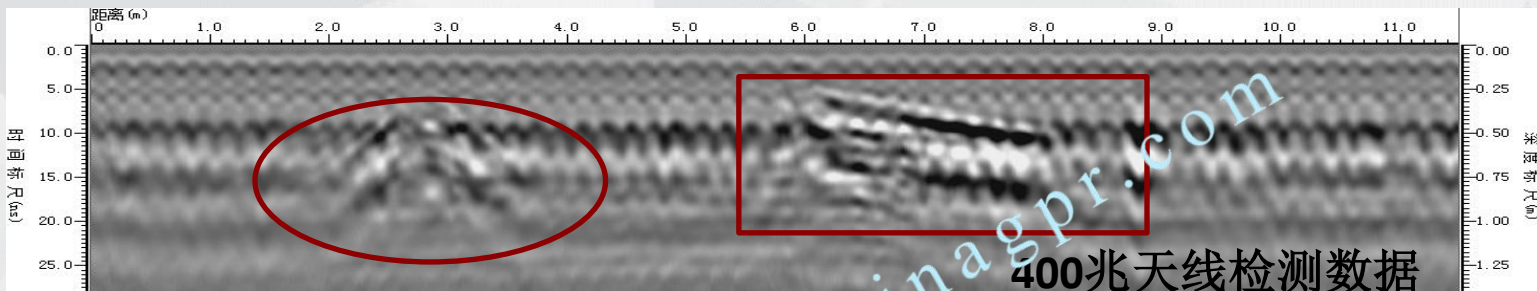
交流群数据

## 1.4 数据分析





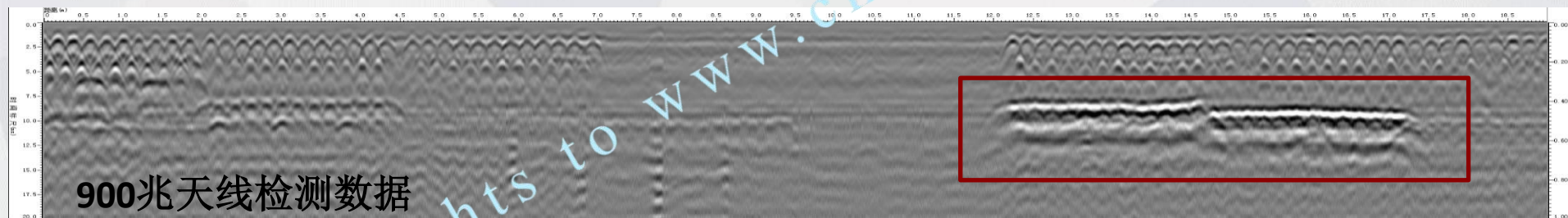
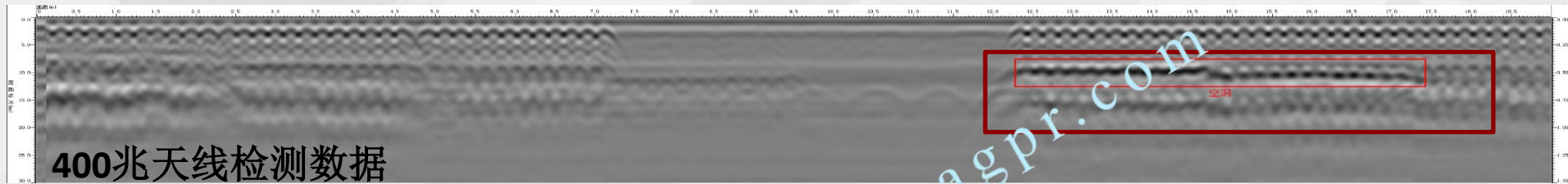
## 1.4 数据分析



试验场地数据：

左侧为倒三角形空洞、右侧为斜长条形空洞

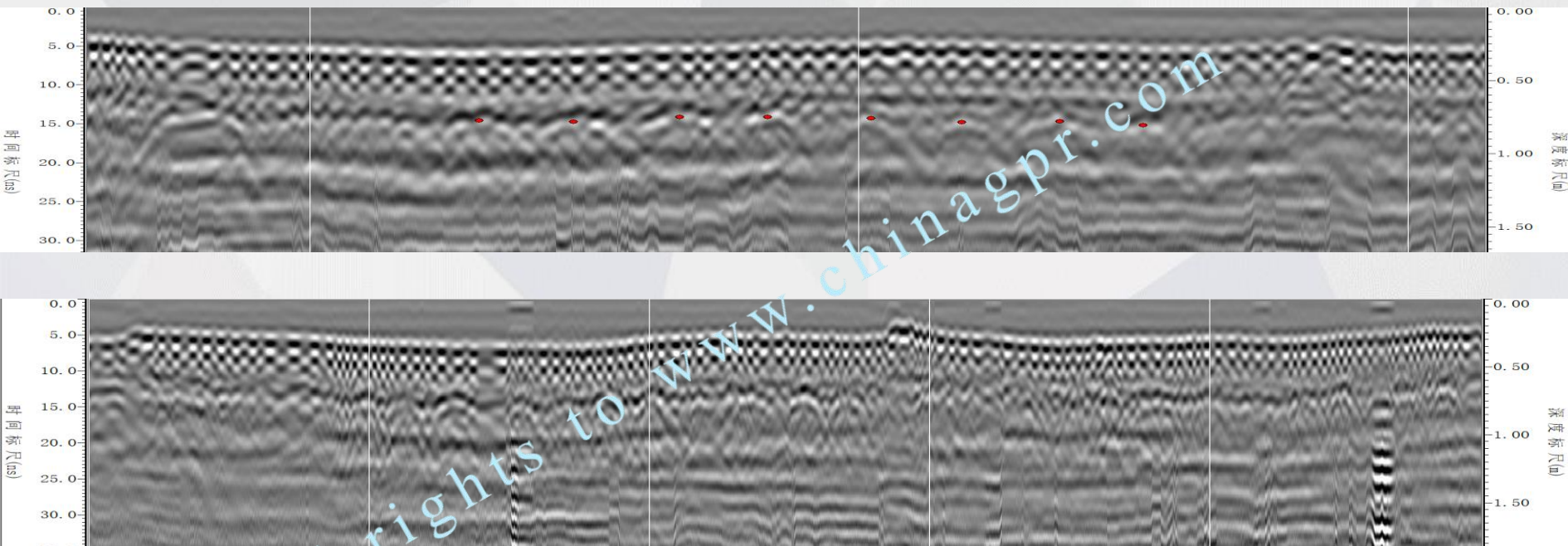
## 1.4 数据分析



试验场地数据：  
深度不同的两个连续长条形空洞

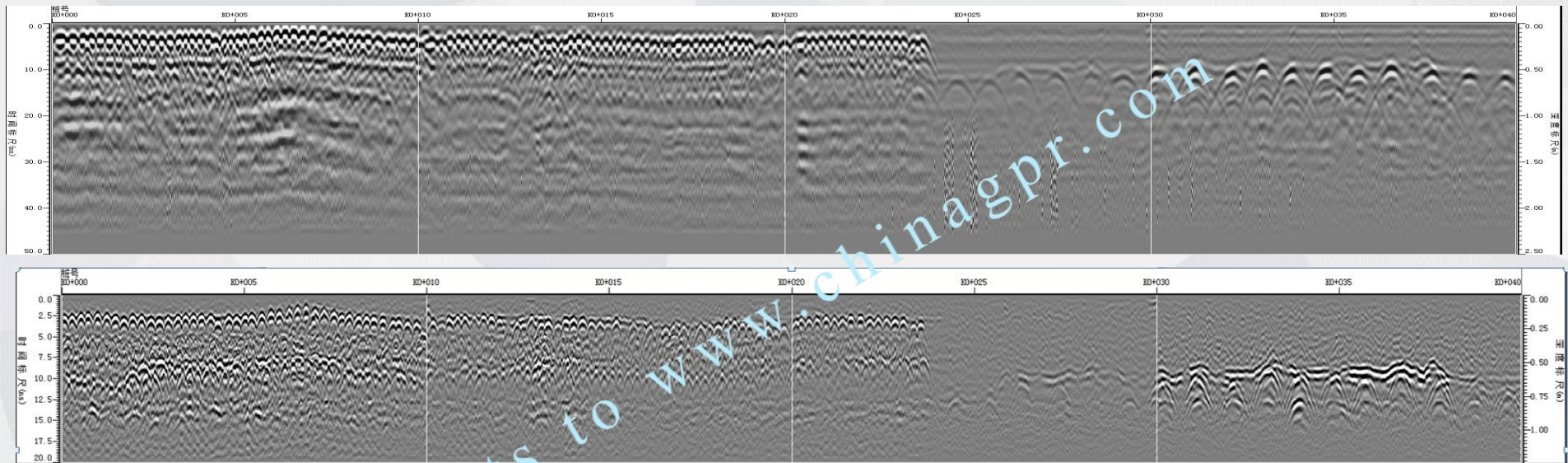


## 1.4 数据分析



厚度分析应该先易后难，即先分析较明显处，再综合分析其它位置的厚度界限

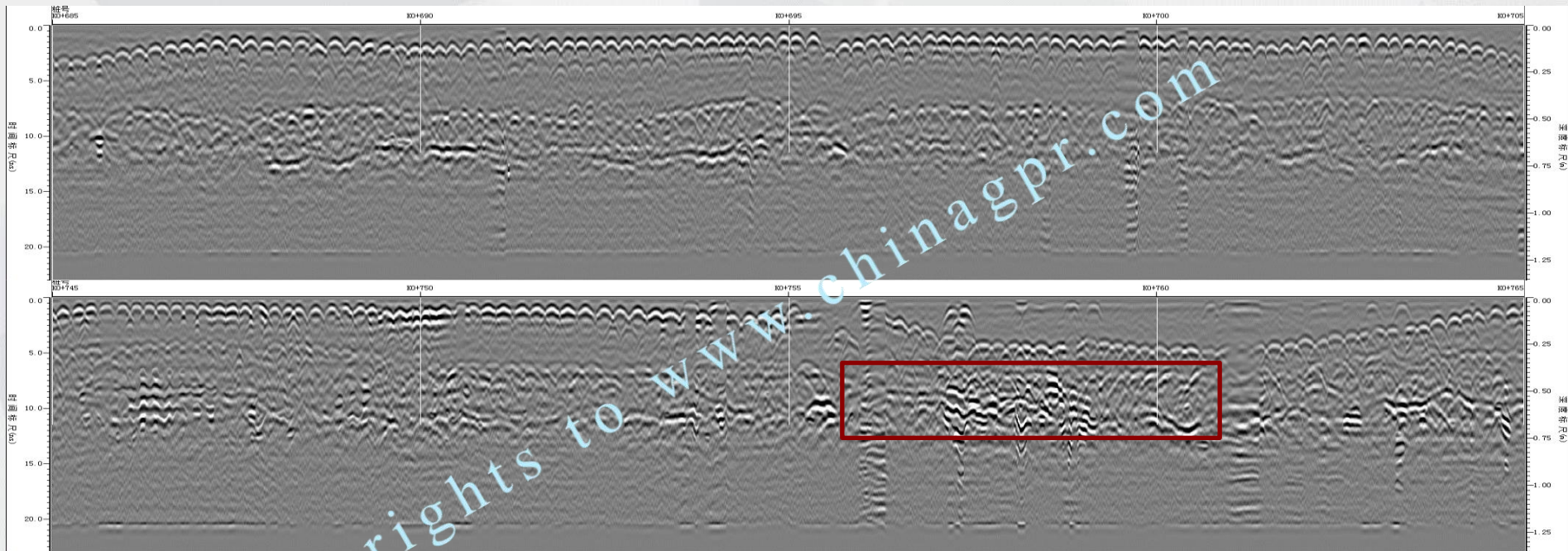
## 1.4 数据分析



厚度分析应该先易后难，即先分析较明显处，再综合分析其它位置的厚度



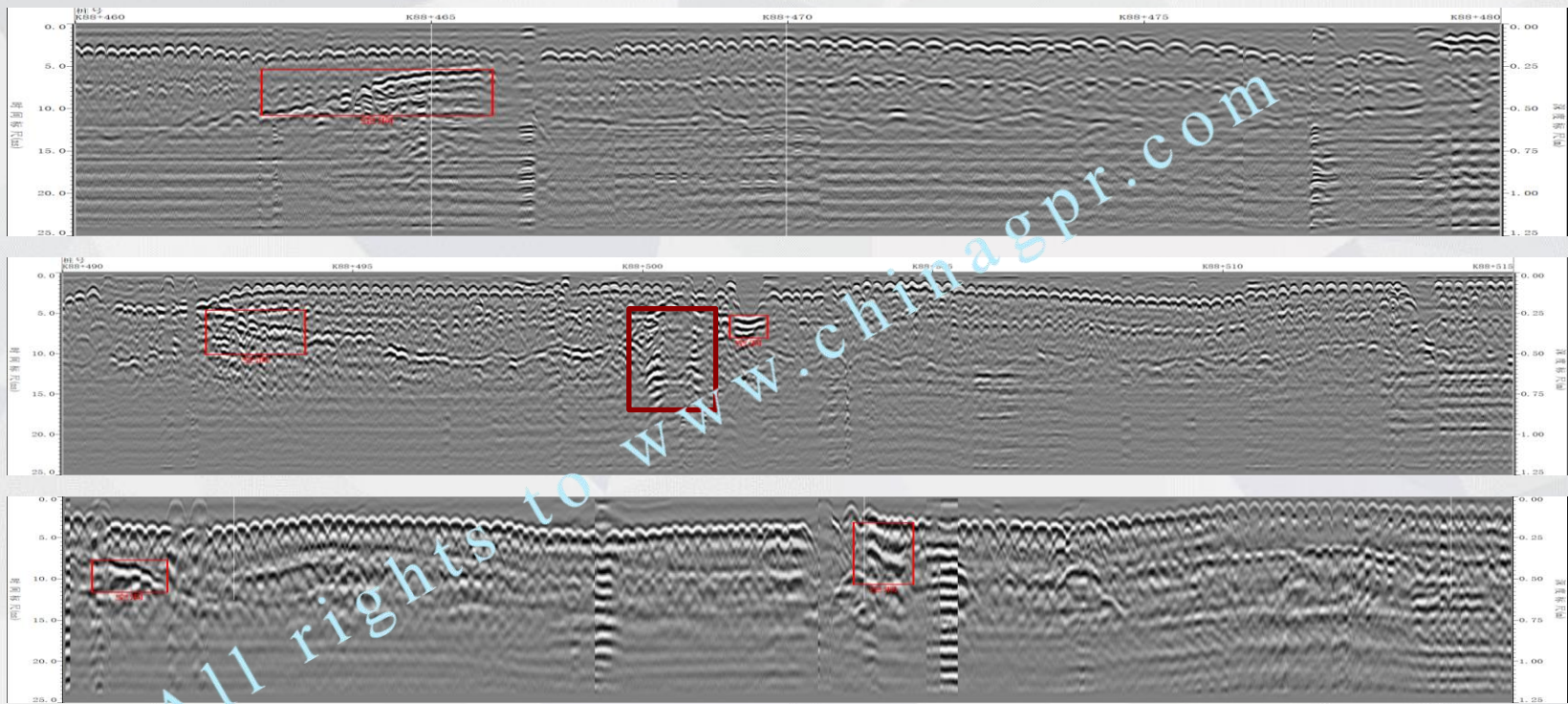
## 1.4 数据分析



钢筋网与衬砌厚度界面清晰可见

右下标注处呈现出区域化不规则强信号（杂乱强信号）可判为严重不密实

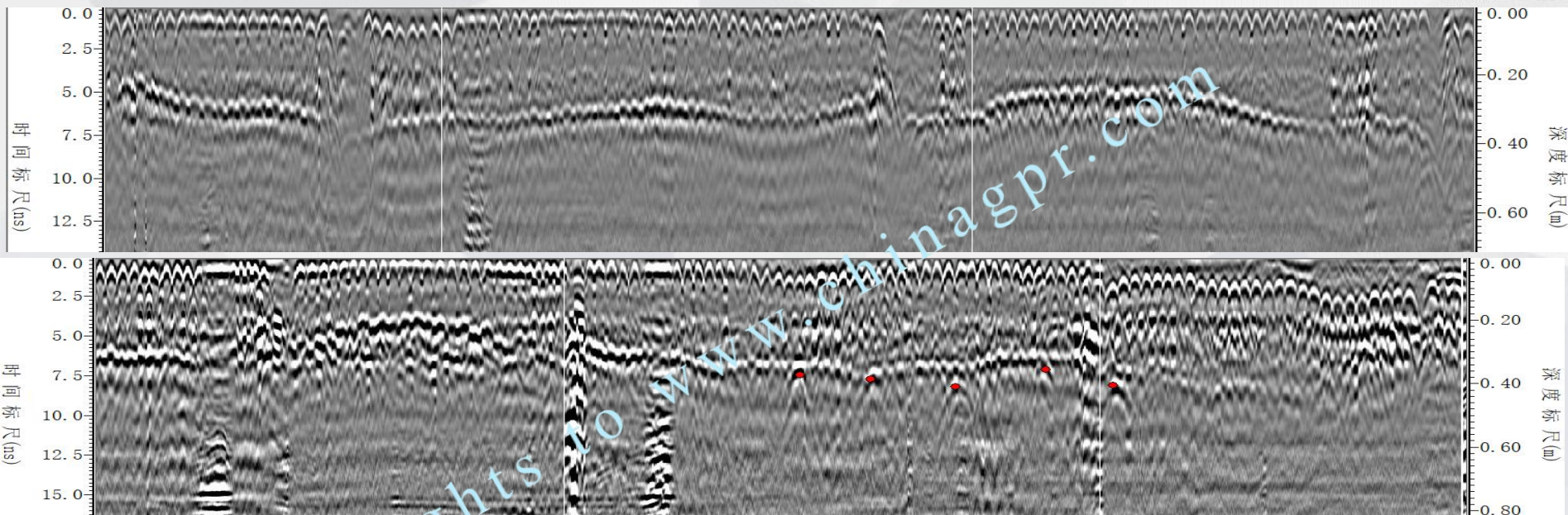
## 1.4 数据分析



缺陷处为进行注浆处理后复测的数据，空洞依然存在



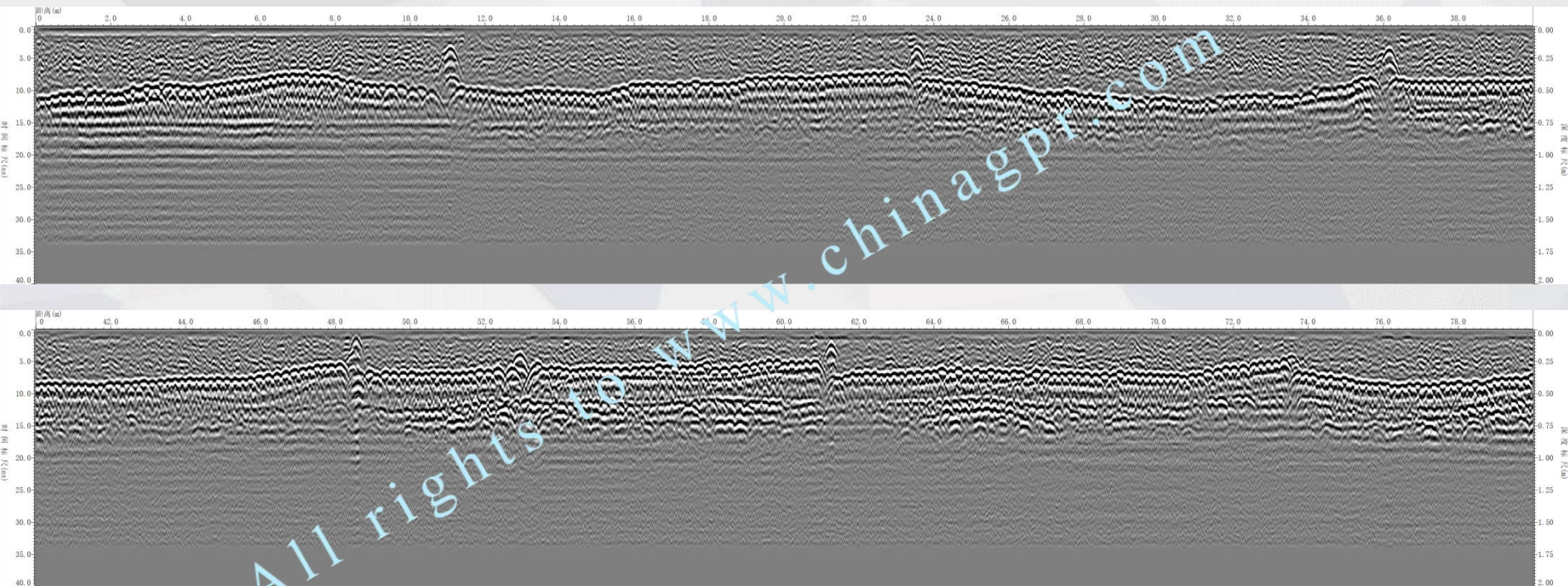
## 1.4 数据分析



二层钢筋网的判断，要能判别是否为第一次钢筋网的多次反射，一般情况下两层钢筋网的趋势会有区分，不会完全一致

厚度分析应该先易后难，即先分析较明显处，再综合分析其它位置的厚度

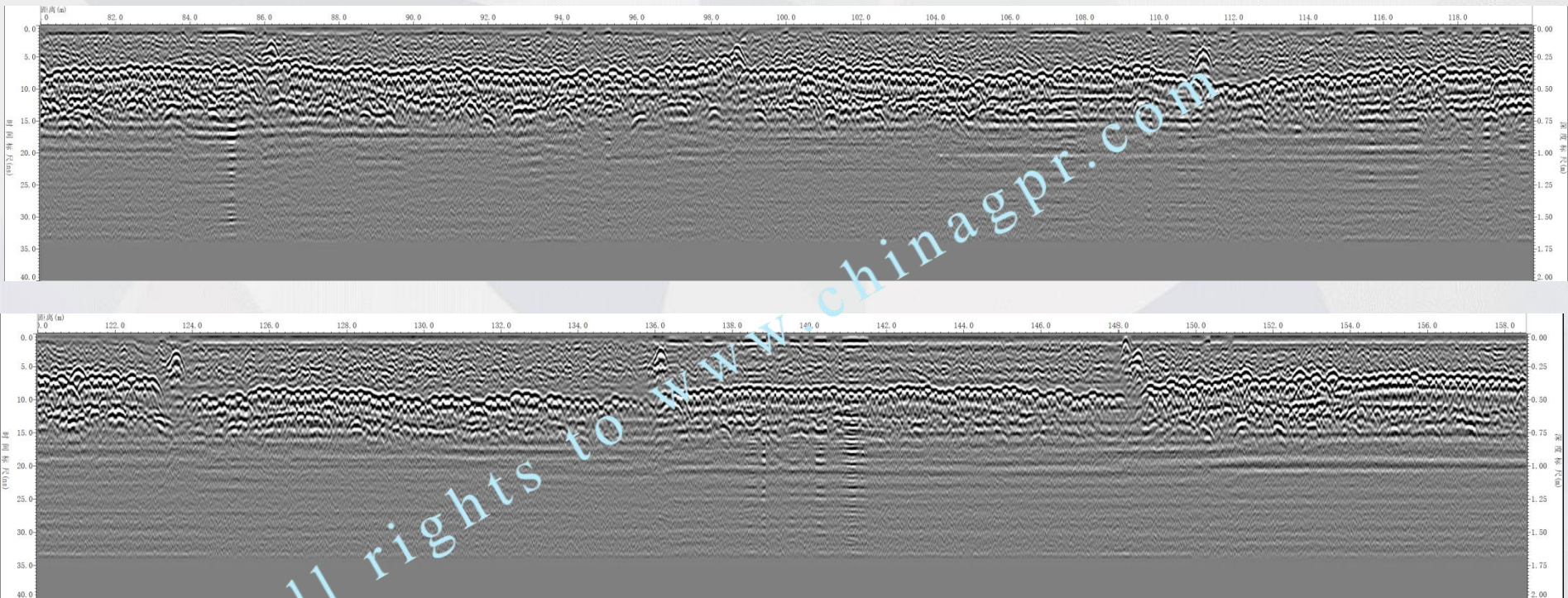
## 1.4 数据分析



交流群数据



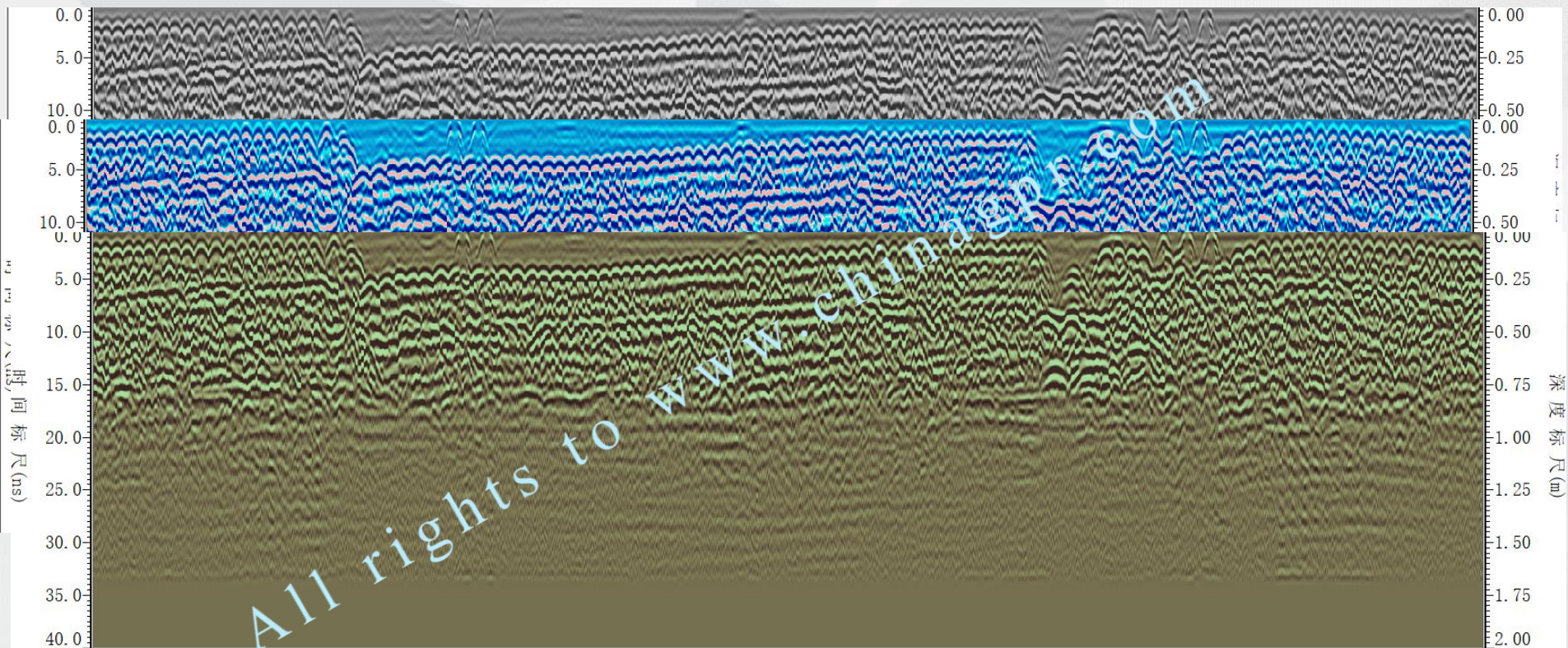
## 1.4 数据分析



交流群数据



## 1.4 数据分析

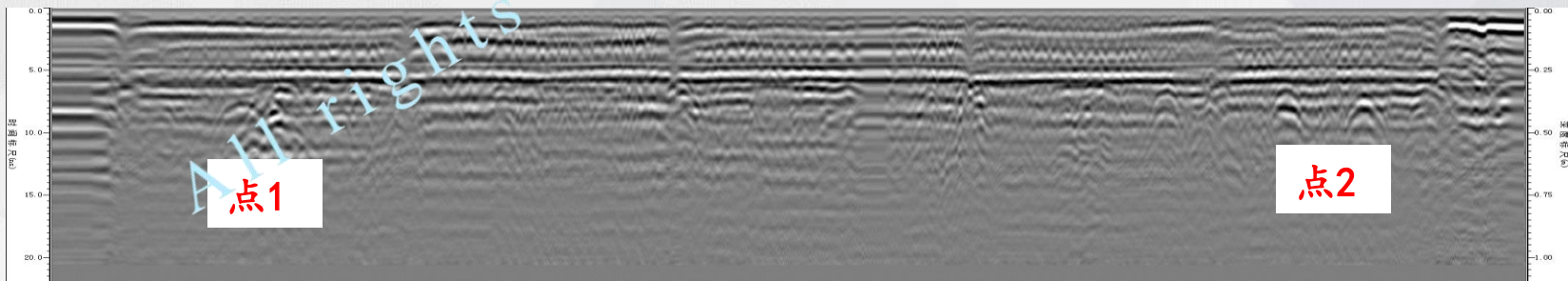


换种显示方式，选择一些小信号接近背景色的色谱，有利于图像的识别



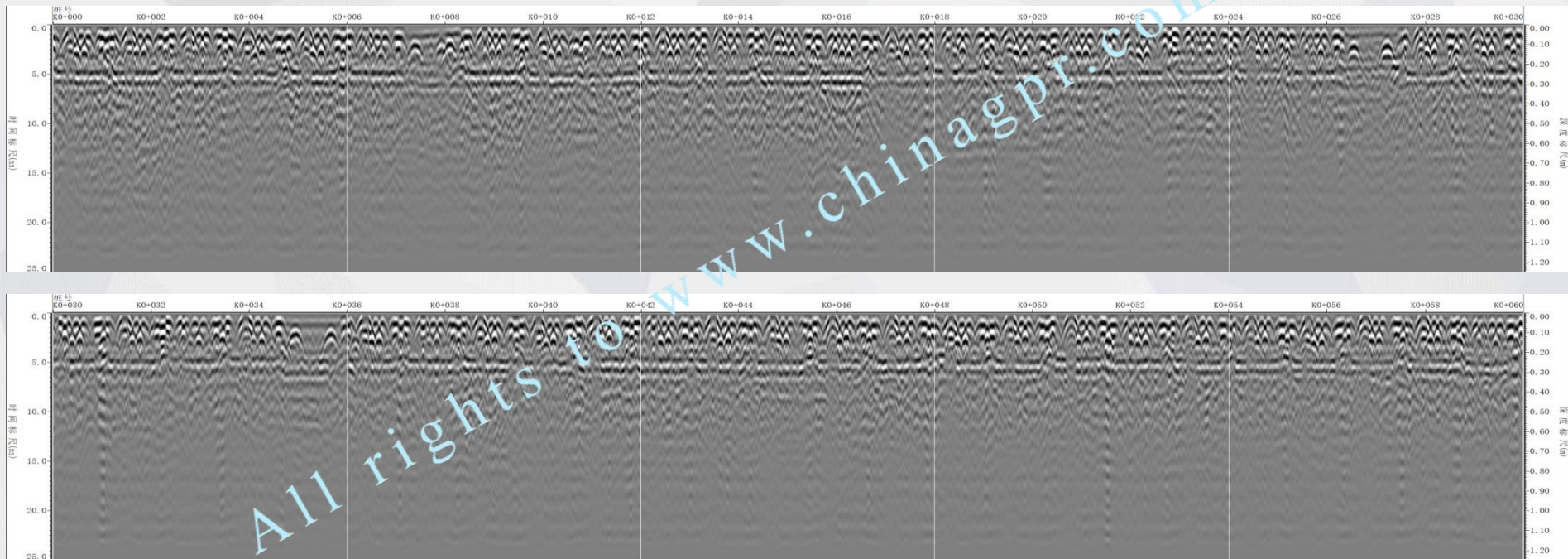
## 1.4 数据分析

如果钢筋网对衬砌背后数据影响较大，在采集数据时可把900兆天线旋转90°检测，使天线的极化方向（既能量最强处）与环向钢筋平行，减弱钢筋网反射信号的强度，突显缺陷处的异常反应



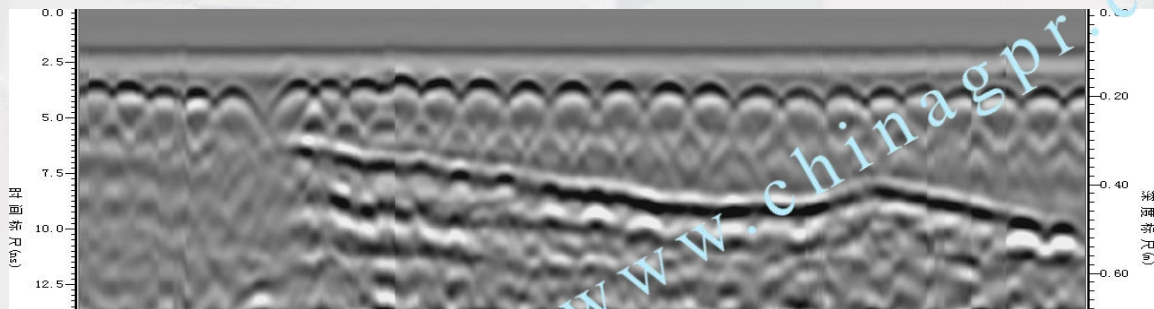
## 1.4 数据分析

### 盾构式地铁衬砌检测图像

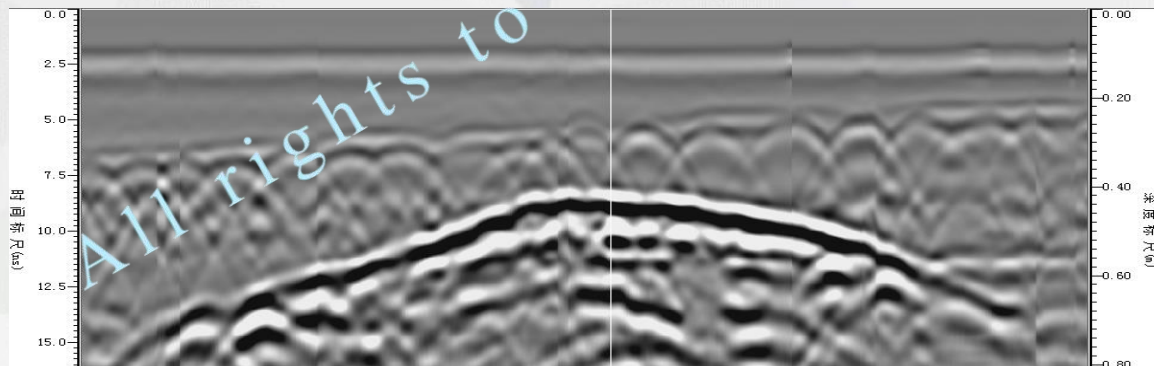


## 1.4 数据分析

圈定缺陷范围：除纵向测线外，需布置环向测线  
下图为经多次注浆处理后图像



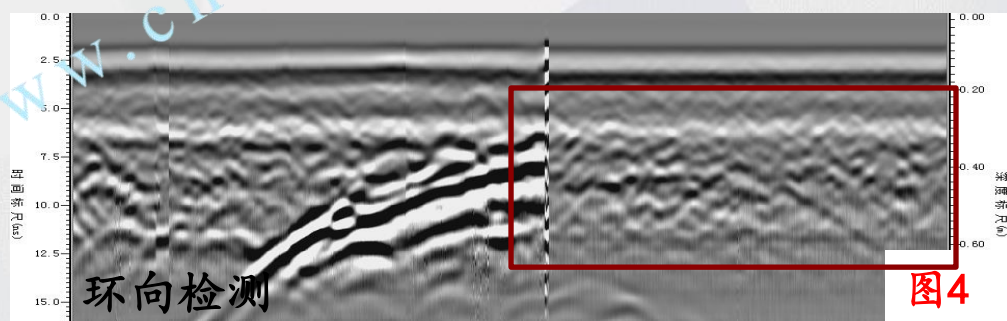
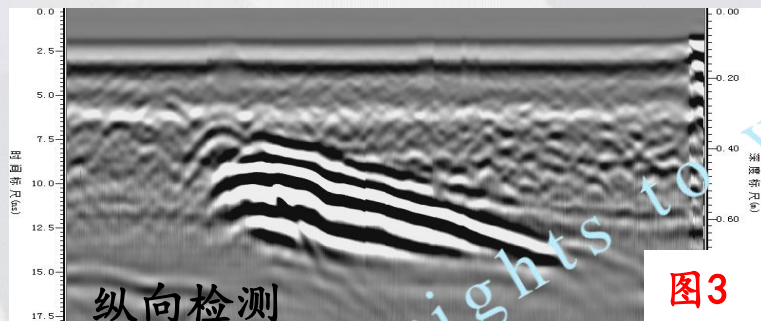
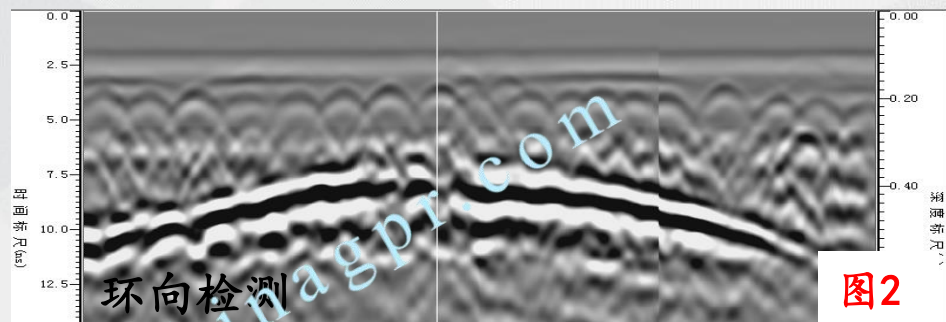
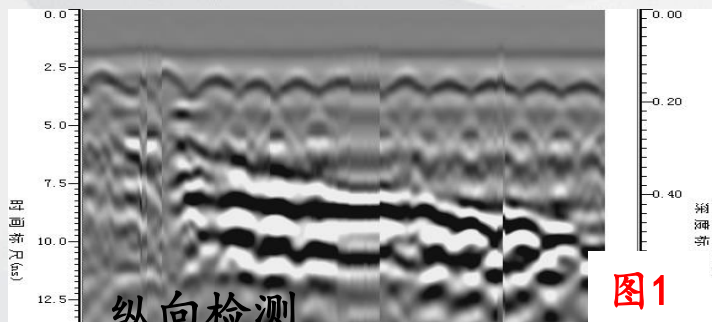
纵向检测



环向检测



## 1.4 数据分析



上图为经过多家单位检测、多次注浆处理后测试的图像，可看到缺陷依然很多  
图4右侧可看到注浆处理留下的痕迹；

结合几组图像的特点，认为拱顶、拱腰处的空洞大多是共存的

## 1.4 数据分析

仰拱检测

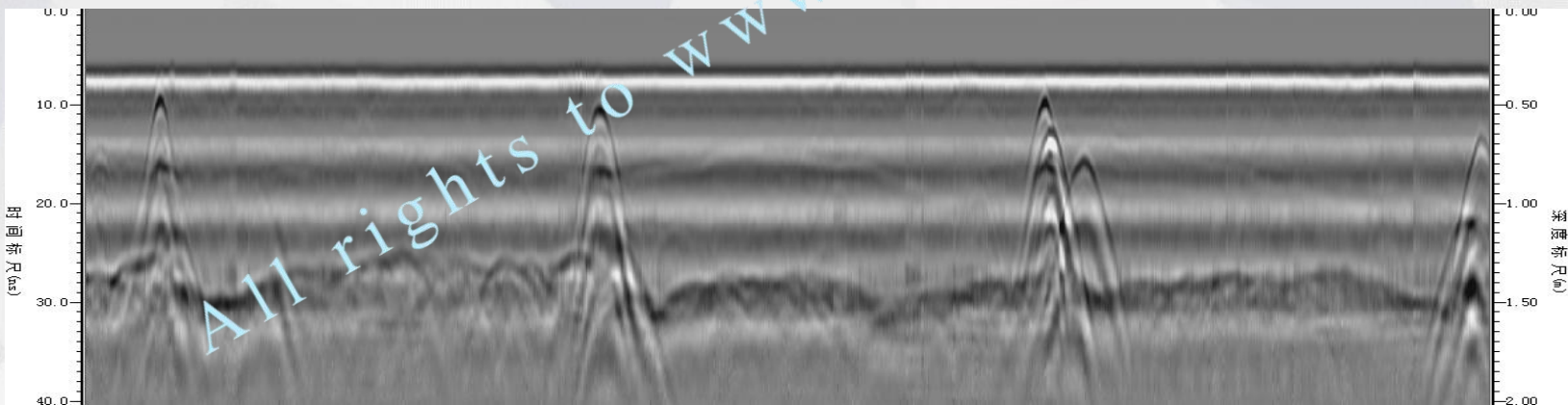
仰拱厚度:

①仰拱内含钢筋网结构类型, 检测较好时可测到钢筋网界面, 应为仰拱回填与仰拱的界面

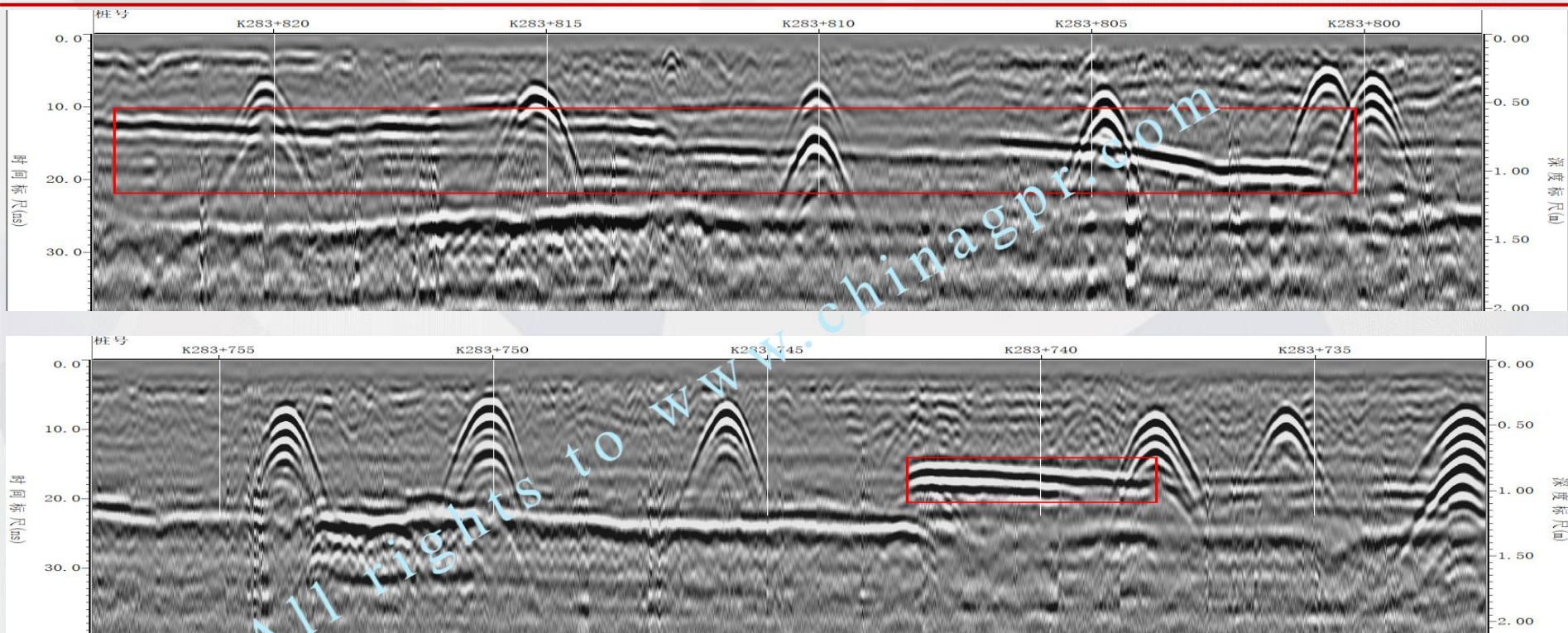
②仰拱内无钢筋网结构, 检测较好情况下, 可检测到仰拱界面

仰拱缺陷:

①可检测仰拱回填时使用片石、杂物、虚渣的区域以及混凝土不密实现象



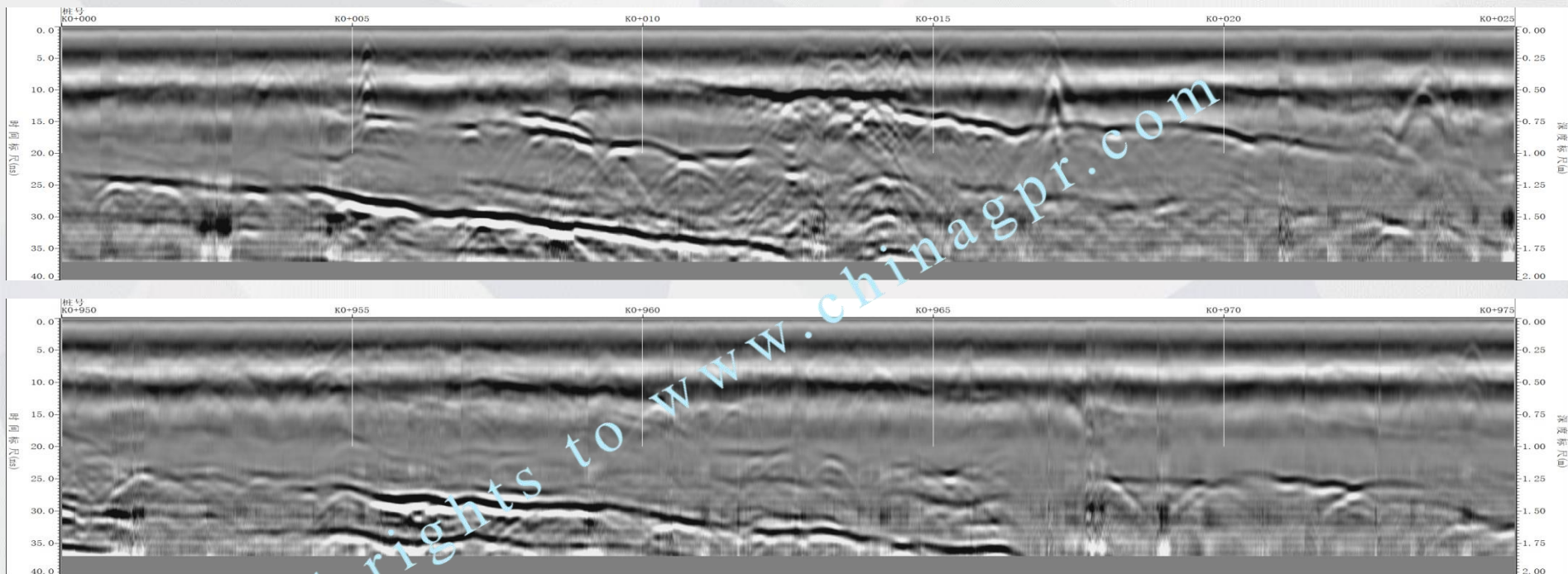
## 1.4 数据分析



不连续浇筑形成的填充层混凝土脱空/不密实  
甘肃某隧道400兆数据，已验证



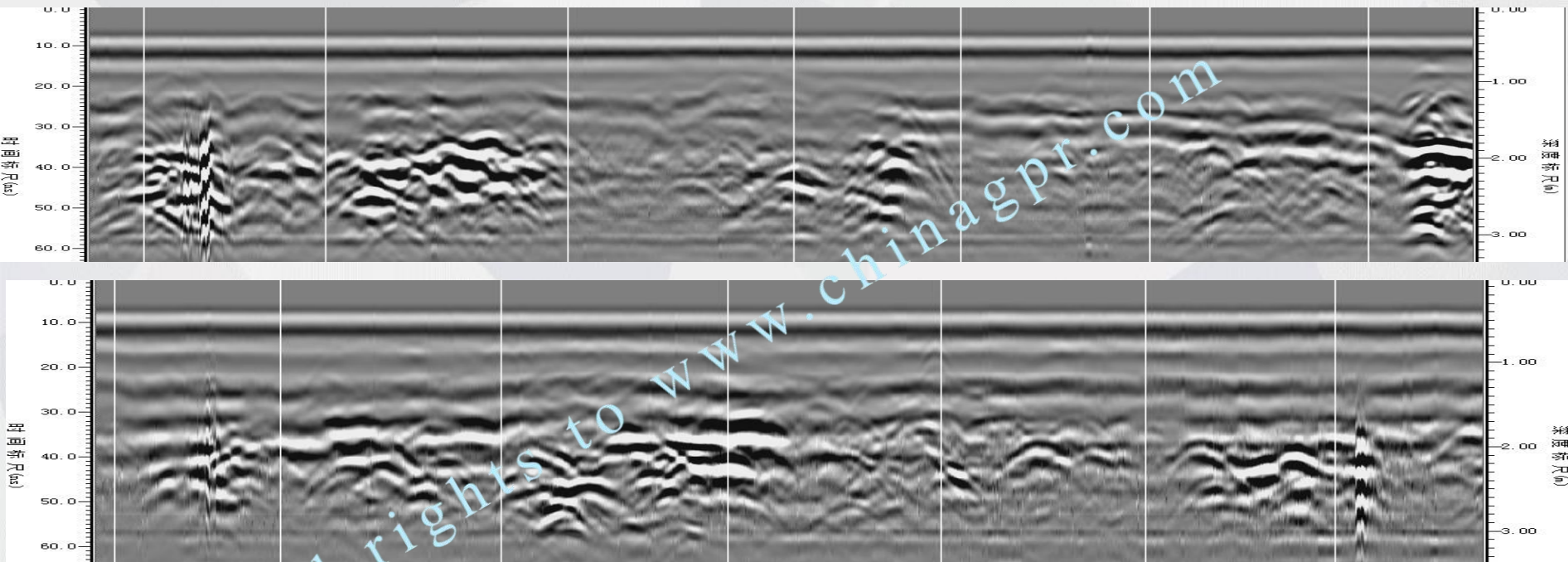
## 1.4 数据分析



多组层位状信号，不连续浇筑形成的不密实

贵州某隧道400兆未验证

## 1.4 数据分析



片石回填导致的异常反射信号

内蒙某隧道已验证

# 《隧道施工质量检测雷达应用分析》目录

## 一、探地雷达在衬砌检测中的应用

1.1 衬砌无损检测及相关规范、规程

1.2 雷达法衬砌检测方案

1.3 典型数据

1.4 数据分析

## 二、探地雷达在超前预报中的应用

2.1 超前预报及相关规范、规程

2.2 雷达法超前预报方案

2.3 典型数据

2.4 数据分析

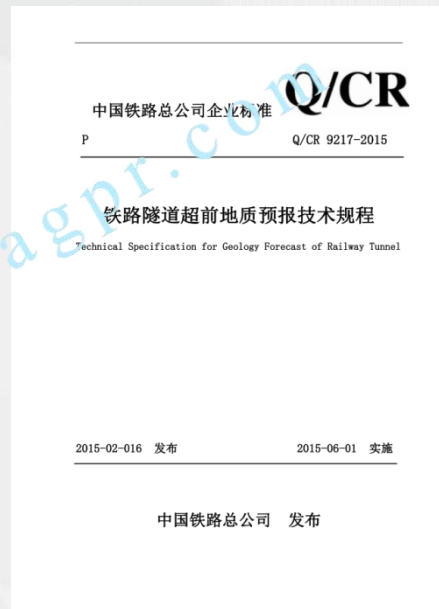
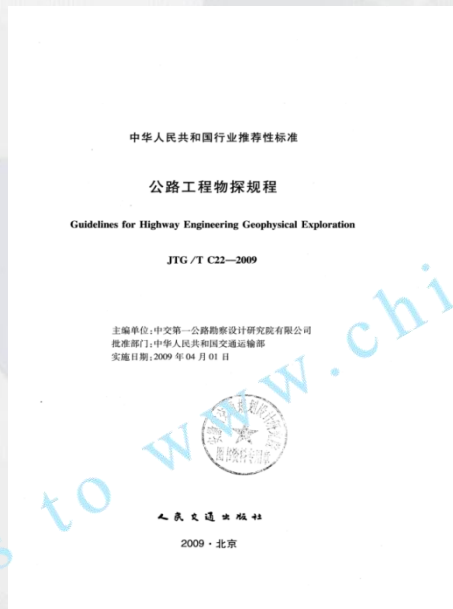
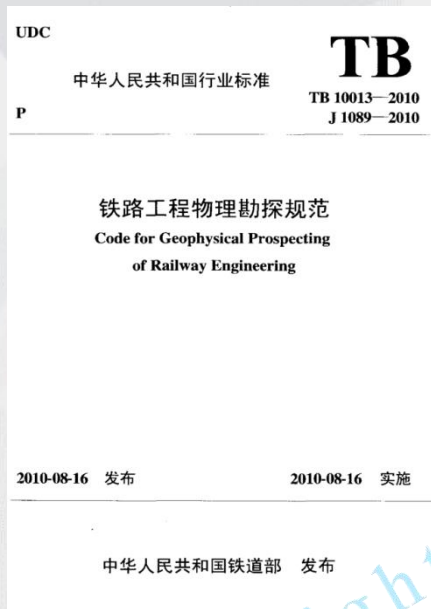


## 2.1超前预报及相关规范、规程

开挖前对地质情况的了解，对于隧洞建设有着十分重要的作用。通过超前预报，及时发现异常情况，预报掌子面前方不良地质体的位置、产状及其围岩结构的完整性与含水的可能性，为正确选择开挖断面、支护设计参数和优化施工方案提供依据，并为预防隧洞涌水、突泥、突气等可能形成的灾害性事故及时提供信息，降低地质灾害发生的机率和危害程度，确保施工安全、提高工效率、缩短施工周期、避免事故损失、节约投资等具有重大的社会效益和经济效益



## 2.1 超前预报及相关规范、规程



参考：铁路工程物理勘探规范（TB 10013-2010）  
公路工程物探规程（JTG / T C22—2009）  
铁路隧道超前地质预报技术规程（Q/CR 9217-2015）

## 2.1 超前预报及相关规范、规程

超前地质预报可采用地质调查法、超前钻探法、物探法和超前导坑预报法，各预报方法应包括下列内容：

- 1 地质调查法：包括隧道地表补充地质调查、洞内开挖工作面地质素描和洞身地质素描、地层分界线及构造线的地下和地表相关性分析、地质作图等。
- 2 超前钻探法：包括超前地质钻探、加深炮孔探测及孔内摄影。
- 3 物探法：包括弹性波反射法（地震波反射法、水平声波剖面法、负视速度法和极小偏移距高频反射连续剖面法等）、电磁波反射法（地质雷达探测）、高分辨直流电法等。
- 4 超前导坑预报法：包括平行超前导坑法、正洞超前导坑法等。

根据预报对象的地质特点，可采取两种或两种以上有效的预报手段进行相互印证的超前地质预报方法。



## 2.1 超前预报及相关规范、规程

超前地质预报可采用长距离预报、中长距离预报和短距离预报，预报长度的划分和预报方法的选择应符合下列规定：

- 1 长距离预报：预报长度 100m 以上。可采用地质调查法、地震波反射法及 100m 以上的超前钻探等。
- 2 中长距离预报：预报长度 30m~100m。可采用地质调查法、弹性波反射法及 30m~100m 的超前钻探等。
- 3 短距离预报：预报长度 30m 以内。可采用地质调查法、弹性波反射法、电磁波反射法（地质雷达探测）及小于 30m 的超前钻探等。

地质雷达在完整灰岩地段预报距离宜在 30m 以内，在岩溶发育地段的有效探测长度则应根据雷达波形判定。连续预报时前后两次重叠长度应不小于 5m。

# 《隧道施工质量检测雷达应用分析》目录

## 一、探地雷达在衬砌检测中的应用

1.1 衬砌无损检测及相关规范、规程

1.2 雷达法衬砌检测方案

1.3 典型数据

1.4 数据分析

## 二、探地雷达在超前预报中的应用

2.1 超前预报及相关规范、规程

**2.2 雷达法超前预报方案**

2.3 典型数据

2.4 数据分析

## 2.2 雷达法超前预报方案

地质雷达探测是利用电磁波在隧道开挖工作面前方岩体中的传播及反射，根据传播速度和反射脉冲波走时进行超前地质预报的一种物探方法。

地质雷达探测主要用于岩溶探测，亦可用于断层破碎带、软弱夹层等不均匀地质体的探测

应符合下列规定：

- 1 探测体与周边介质之间应存在明显介电常数差异，电磁波反射信号明显。
- 2 探测体具有足以被探测的规模，探测体的厚度大于探测天线有效波长的 $1/4$ ，探测体的宽度或相邻被探测体可以分辨的最小间距大于探测天线有效波第一菲涅尔带半径。
- 3 避开高电导屏蔽层或大范围的金属构件。存在电、磁、振动等外界干扰时，探测对象的异常能够从干扰背景中区分出来。



## 2.2 雷达法超前预报方案

地质雷达探测的数据采集应符合下列要求：

- 1 通过试验选择雷达天线的工作频率、确定介电常数。当探测对象情况复杂时，宜选择两种及以上不同频率的天线。当多个频率的天线均能符合探测深度要求时，宜选择频率相对较高的天线，一般宜采用 100MHz 屏蔽天线。
- 2 测网密度、天线间距和天线移动速度应适应探测对象的异常反映；掌子面上宜布置两条测线，必要时可布置成“井”字形或其它网格形式。
- 3 选择合适的时间窗口和采样间隔，并根据数据采集过程中的干扰变化和图像效果及时调整工作参数。

## 2.2 雷达法超前预报方案

4 宜采用连续测量方式，不能连续测量的地段可采用点测。连续测量时天线应匀速移动，并与仪器的扫描率相匹配；点测时应在天线静止状态采样，测点距不大于 0.3m

5 隧址区内不应有较强的电磁干扰；现场测试时应清除或避开测线附近的金属物等电磁干扰物；当不能清除或避开时应在记录中注明，并标出位置。

6 支撑天线的器材应选绝缘材料，天线操作人员应与工作天线保持相对固定的位置。

7 测线上天线经过的表面应相对平整，无障碍，且天线易于移动；测试过程中，应保持工作天线的平面与探测面基本平行，距离相对一致。

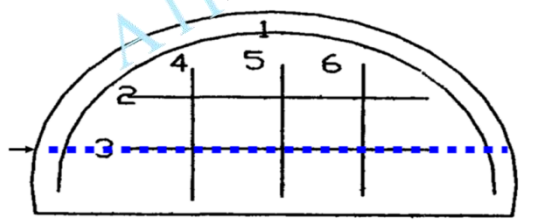
8 现场记录应注明观测到的不良地质体与地下水体的位置与规模等。

9 重点异常区应重复观测，重复性较差时宜进行多次观测并查明原因。

## 2.2 雷达法超前预报方案

个人总结：

1. 检测时天线应密贴检测面，保证良好的检测效果。
2. 探测过程中应避免周围环境的强干扰。开挖台车、钢支撑、钢筋网片等均会对探测结果产生影响，应远离或避免上述干扰物。
3. 单条测线很难覆盖整个掌子面，检测时需布置多条测线。如需检测掌子面以外围岩地质情况，需要在相应方向布置测线。
4. 现场记录掌子面情况。节理裂隙、岩层产状、出水带要记录清楚，保存现场照片。
5. 探测方式，推荐使用人工点测（叠加参数为20次），点测间距为10-20cm，脉冲采集道数不少于50道。
6. 预报里程，15-30米，完整灰岩地段宜在30米以内，在岩溶发育地段的有效探测长度则应根据雷达波形判定。连续预报时，两次重叠长度应在5米以上。





## 2.2 雷达法超前预报方案

### LTD-2600主机常用参数

探测方式	频率 (MHz)	扫描速度 (道/秒)	采样点数 (点/道)	时间窗口 (ns)	增益	叠加次数	取样检测 (cm)
点测模式	100	32	1024	400-800	自动增益	20	10-20
时间模式	100	32/64	1024	400-800	自动增益	4	

注：增益时需要把天线紧贴检测面，然后选择自动增益，自动增益后在检测面上移动天线，从雷达主机上观察图像上的增益大小是否合适，如需微调可通过分段增益进行调节

# 《隧道施工质量检测雷达应用分析》目录

## 一、探地雷达在衬砌检测中的应用

1.1 衬砌无损检测及相关规范、规程

1.2 雷达法衬砌检测方案

1.3 典型数据

1.4 数据分析

## 二、探地雷达在超前预报中的应用

2.1 超前预报及相关规范、规程

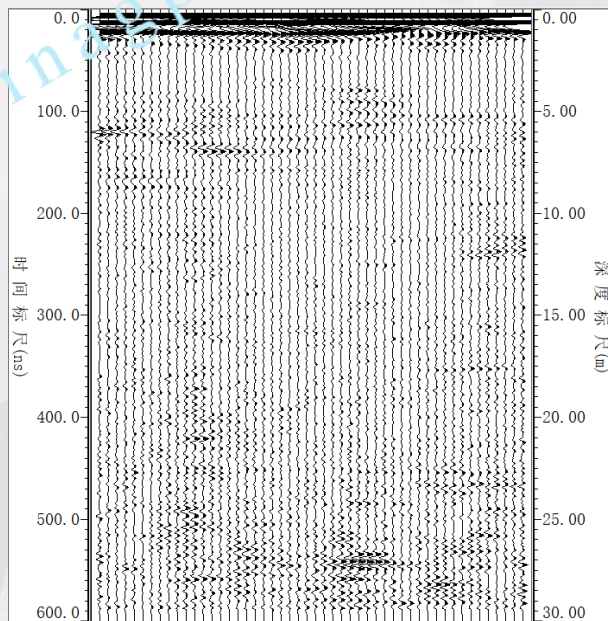
2.2 雷达法超前预报方案

**2.3 典型数据**

2.4 数据分析

## 2.3 典型数据

- ❖ 在工程勘察中，常见的不良地质现象有：断层破碎带、裂隙带、富水带、岩溶洞穴、岩性变化带等。以下分别采用了来自不同工区的地质雷达波形图对上几种典型地质现象与地质雷达特征图像的对应关系进行分析。
- ❖ 完整岩体（均一岩体）：一般来说，完整的岩体，电性差异很小，没有明显的反射界面，电磁波基本没有反射信号。但往往由于风化及含水率等影响，在岩体内部会有些微弱的信号反射，其表现出来的特征就是一些中高频的反射信号，整个范围内频率变化小，同相轴连续且均一平行，信号的振幅弱。



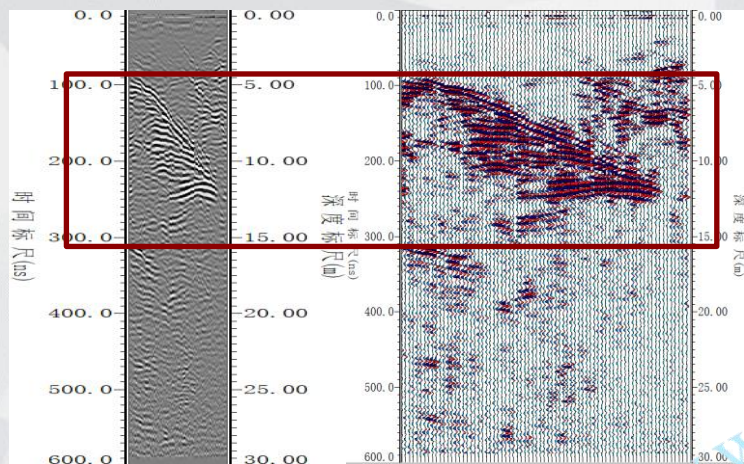


## 2.3 典型数据

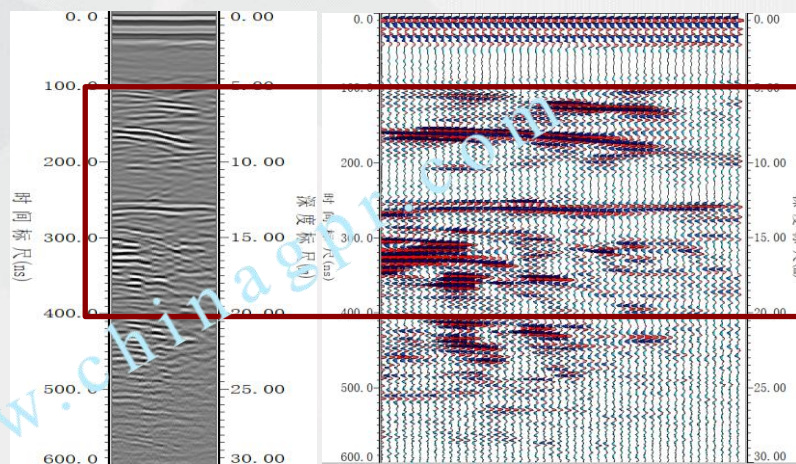
❖ 断层、裂隙带：断层是一种破坏性地质构造，其内通常发育有破碎岩体、泥或地下水等，介质极不均匀，电性差异大，且断层两侧的岩体常有节理和褶皱发育，介质均一性差。而裂隙带通常存在于断层影响带、岩脉以及软弱夹层内，裂隙内也有各种不同的非均匀充填物，介电差异大。它们一般都有明显的反射界面，这就为地质雷达创造了良好的应用条件。

❖ 在断层或裂隙带，其地质雷达图像和波形特征较为相似，通常表现为断层和裂隙界面反射强烈，反射面附近振幅显著增强且变化大能量团分布不均匀，破碎带和裂隙带内常产生绕射、散射，波形杂乱，同相轴错断，在深部甚至模糊不清；电磁波能量衰减快且规律性差，特别是高频部分衰减较快，自动增益梯度较大；一般反射波同相轴的连线为破碎带或裂隙带的位置。

## 2.3 典型数据



断层破碎带雷达图像



裂隙破碎带雷达图像

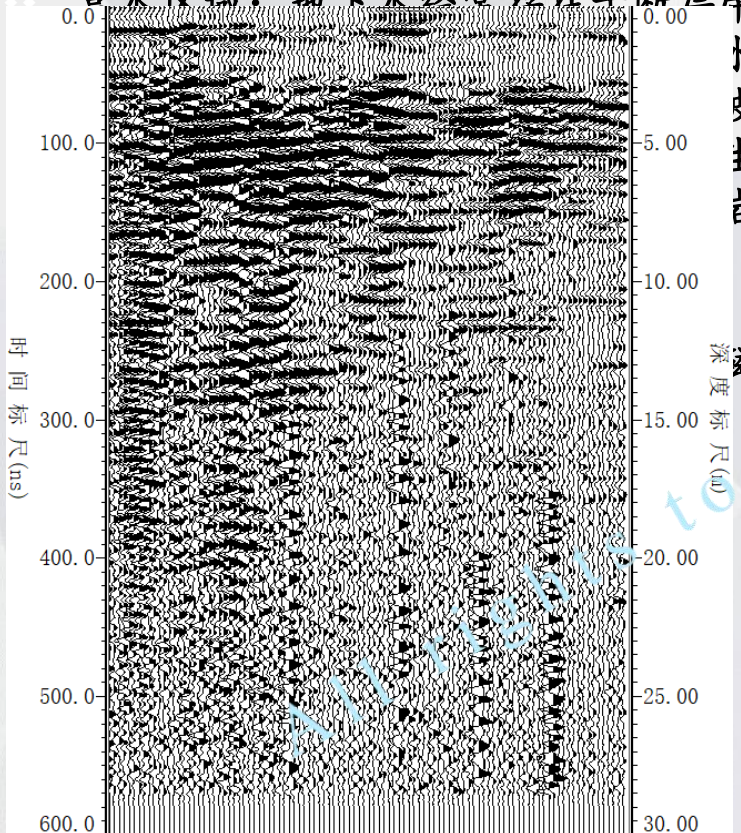
虽然两者的雷达特征图像相似，但通过对比分析可大致把它们分辨开来：

- 1、断层破碎带的影响范围通常比裂隙带宽，在地质雷达图像上有较宽的异常反应。相反的，裂隙带异常在雷达图像上一般表现为相对较窄的条带。
- 2、断层破碎带的波幅变化范围通常比裂隙带大，而裂隙带的振幅一般为高幅
- 3、在相对干燥情况下，断层破碎带在地质雷达图像上同相轴的连续性不如裂隙带，它的同相轴错断更明显，其波形更加杂乱，而裂隙带在地质雷达图像上同相轴的连续性反映了裂隙面是否平直、连续。
- 4、探测时可参考当地的区域地质背景资料和钻孔资料，对可能遇到的地质现象做出大致的判断，为图像解释时这两种地质现象的分辨识别提供依据。



## 2.3 典型数据

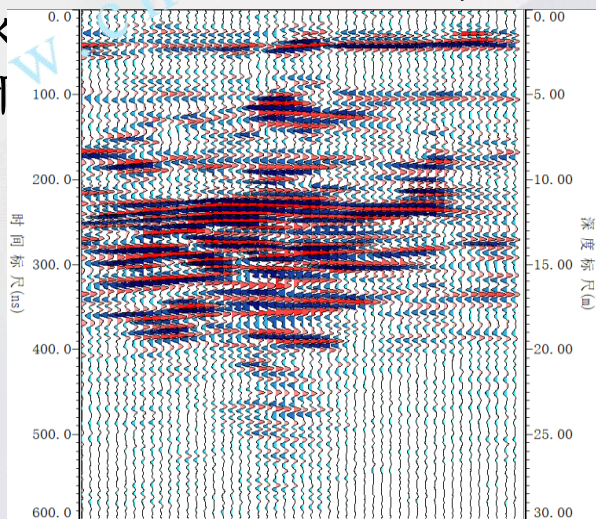
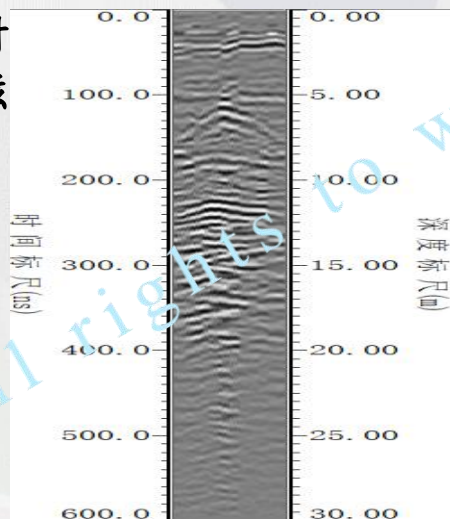
富水区找，地下水经学左左干断巨滑 列砂定集世以了出治发本世七 合上组成于地七各外





## 2.3 典型数据

岩溶洞穴一般出现在灰岩地层中，洞穴中可能为空、含水或填充其他物质，其地质雷达图像和波形特征通常表现为：岩溶洞穴在地质雷达图像上的形态特征主要取决于洞穴的形状、大小以及填充物的性质，一般表现为由许多双曲线强反射波组成；在洞穴侧壁上一般为高幅、低频、等间距的多次反射波组，特别是无填充物或充满水时反射波更强，而洞穴底界面反射则不太明显，只有当洞穴底部部分充填水或粘土、粉砂、砂砾性物质时底部反射波会有所增强，可见一组较短周期的细密弱反射



# 《隧道施工质量检测雷达应用分析》目录

## 一、探地雷达在衬砌检测中的应用

1.1 衬砌无损检测及相关规范、规程

1.2 雷达法衬砌检测方案

1.3 典型数据

1.4 数据分析

## 二、探地雷达在超前预报中的应用

2.1 超前预报及相关规范、规程

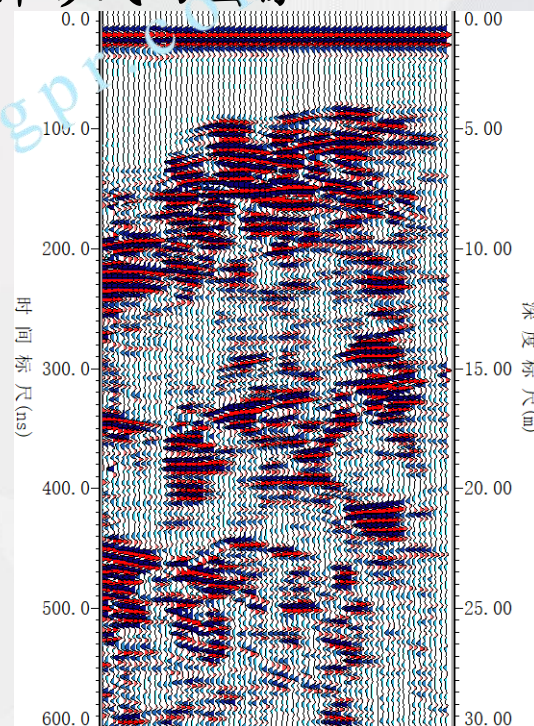
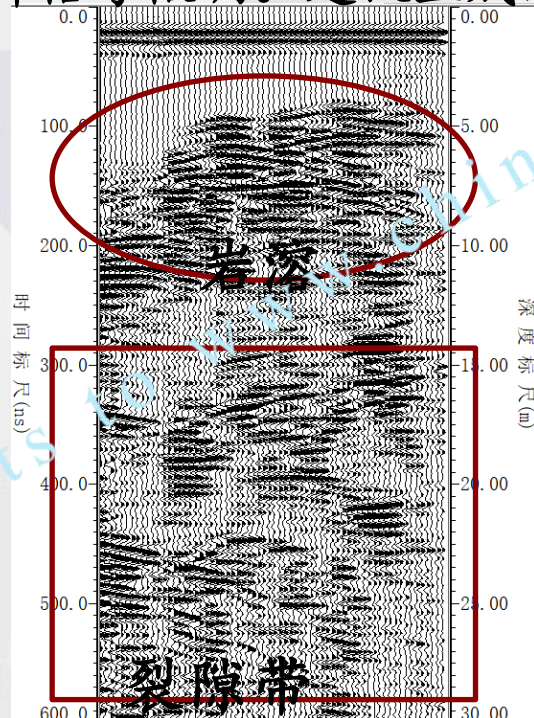
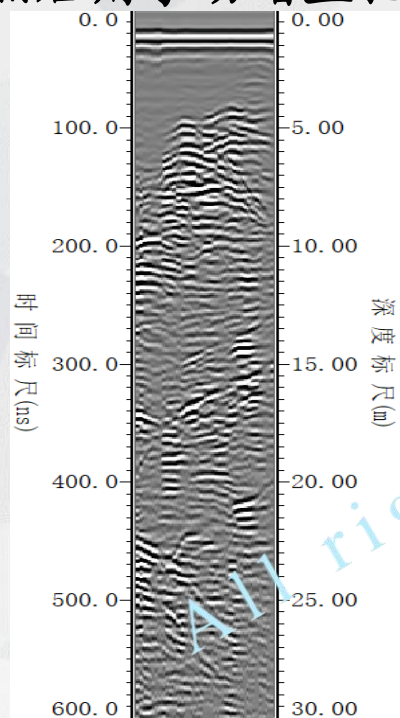
2.2 雷达法超前预报方案

2.3 典型数据

2.4 数据分析

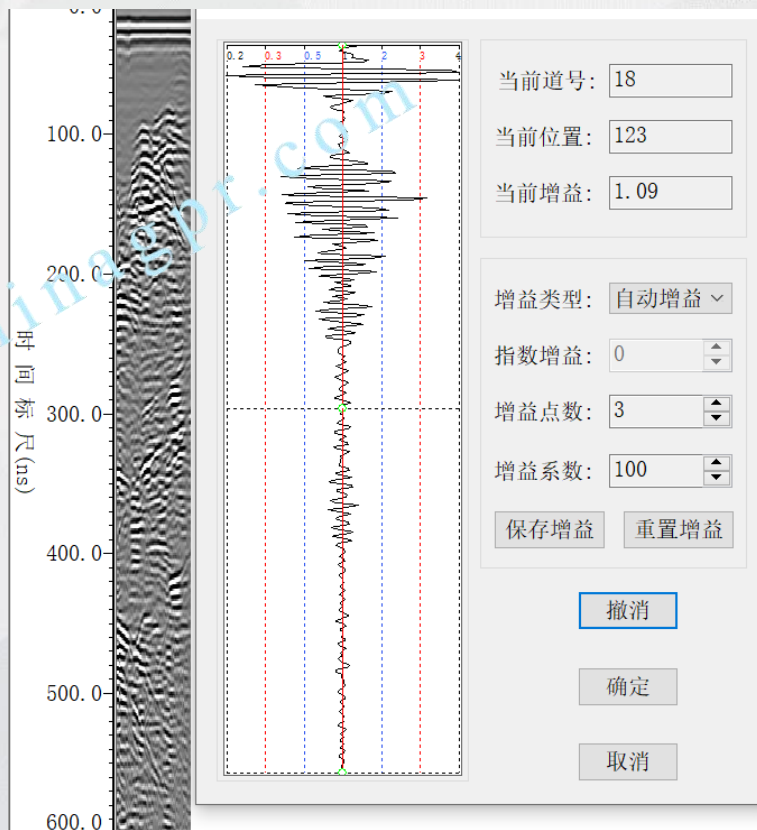
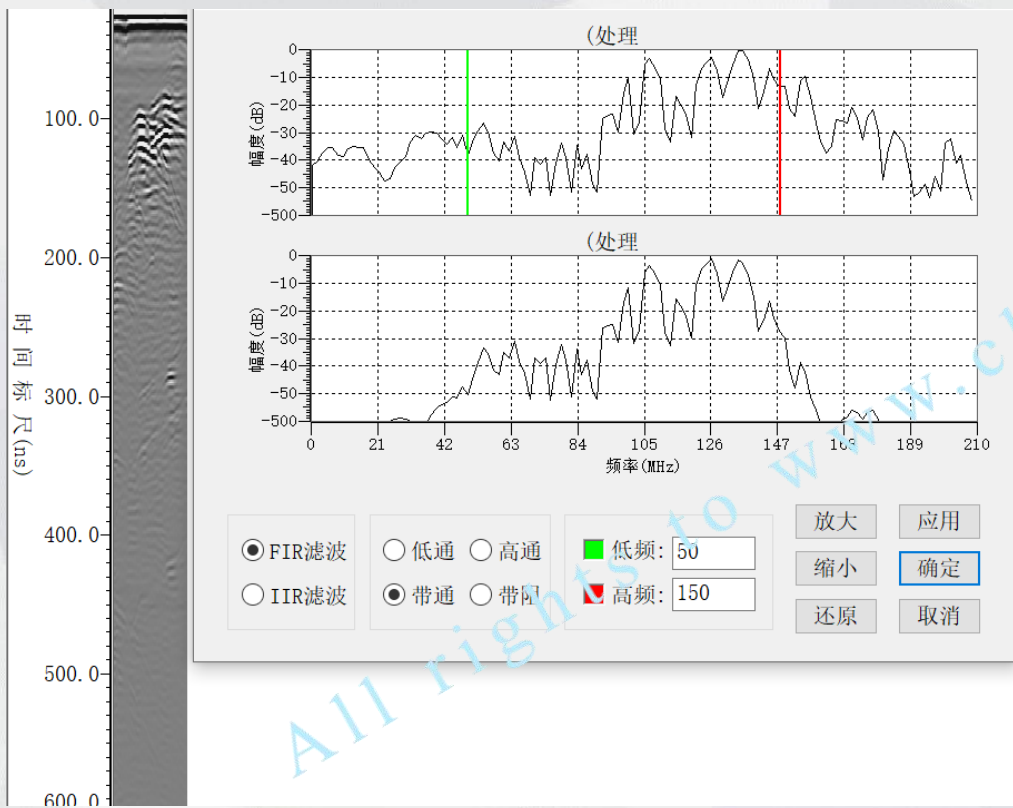
## 2.4 数据分析

图像处理很关键，建议在幅度补偿或自动增益的状态下查看有效信号，然后用手动增益把局部信号微调。建议生成两种形式的图像

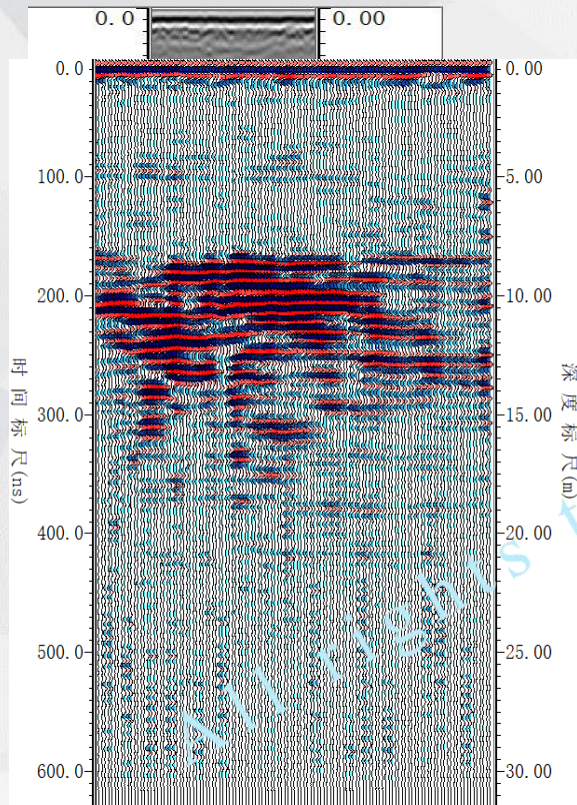




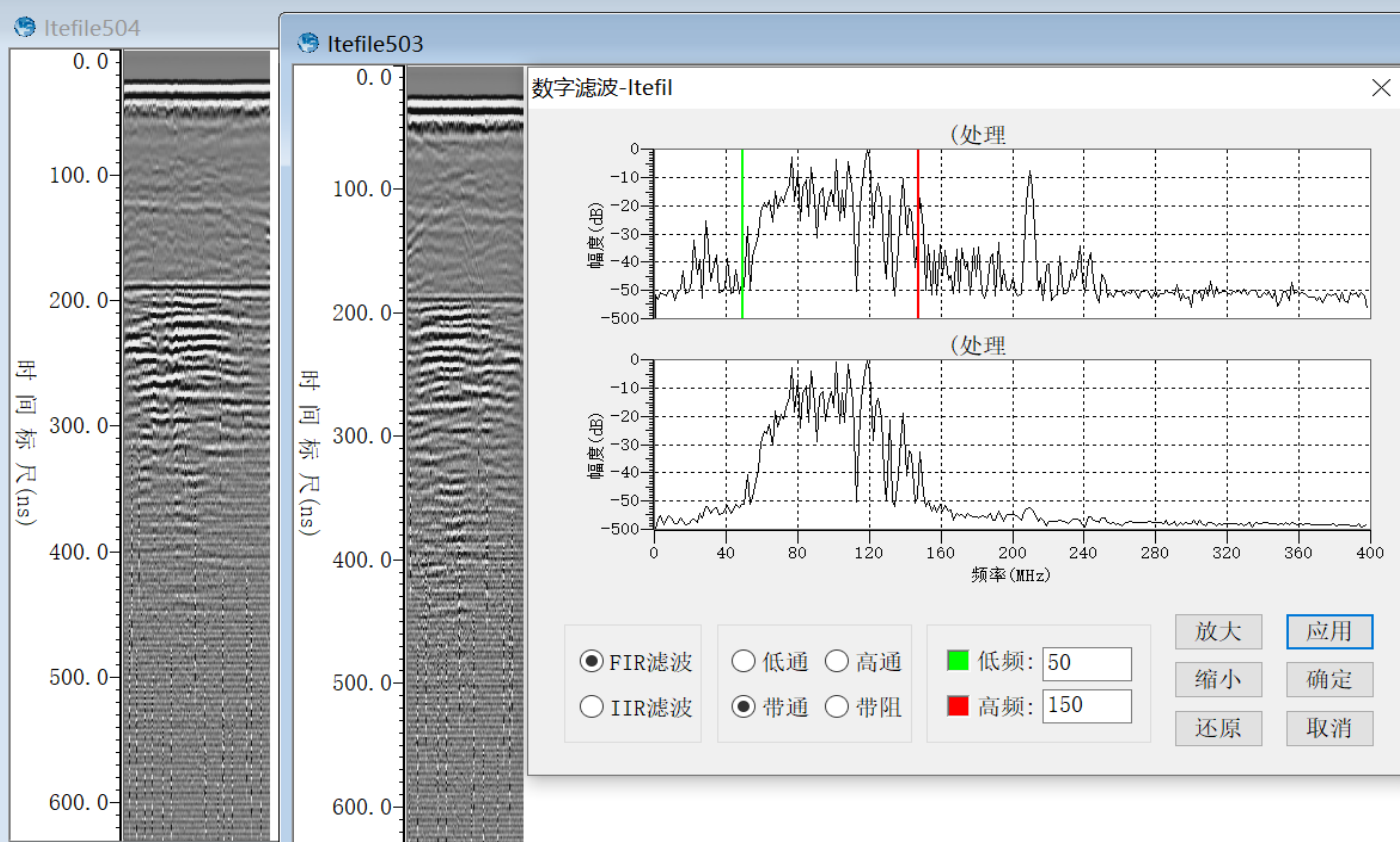
## 2.4 数据分析



## 2.4 数据分析

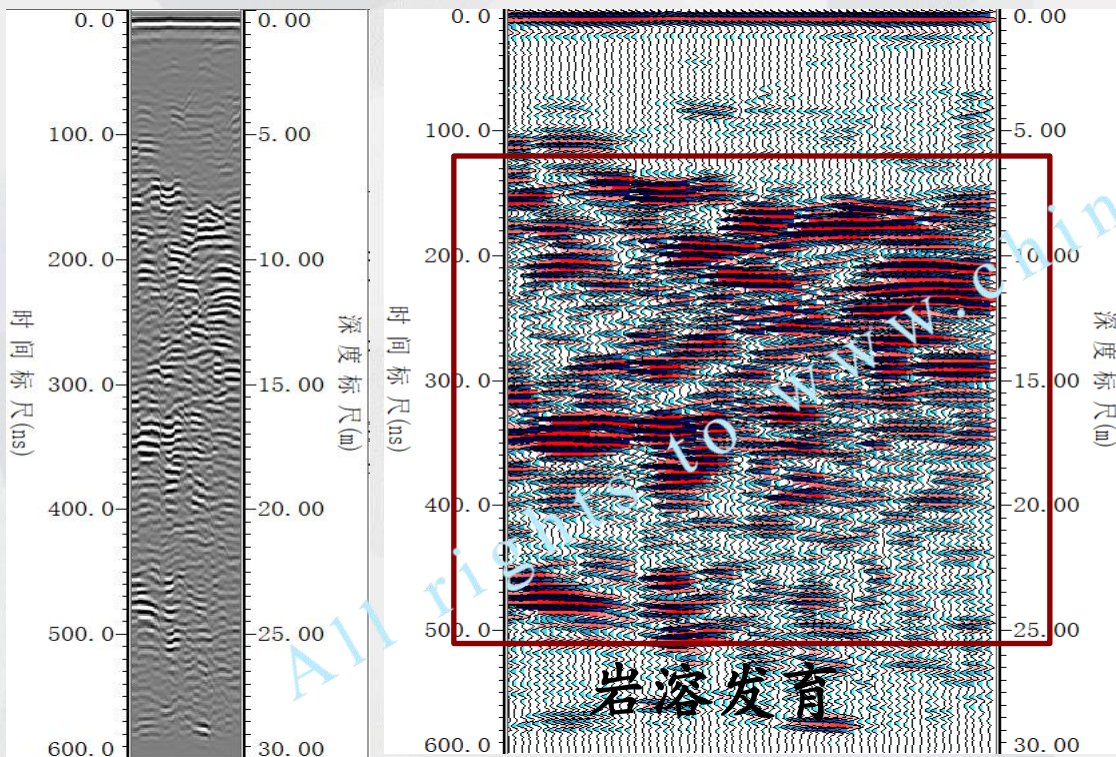


## 2.4 数据分析

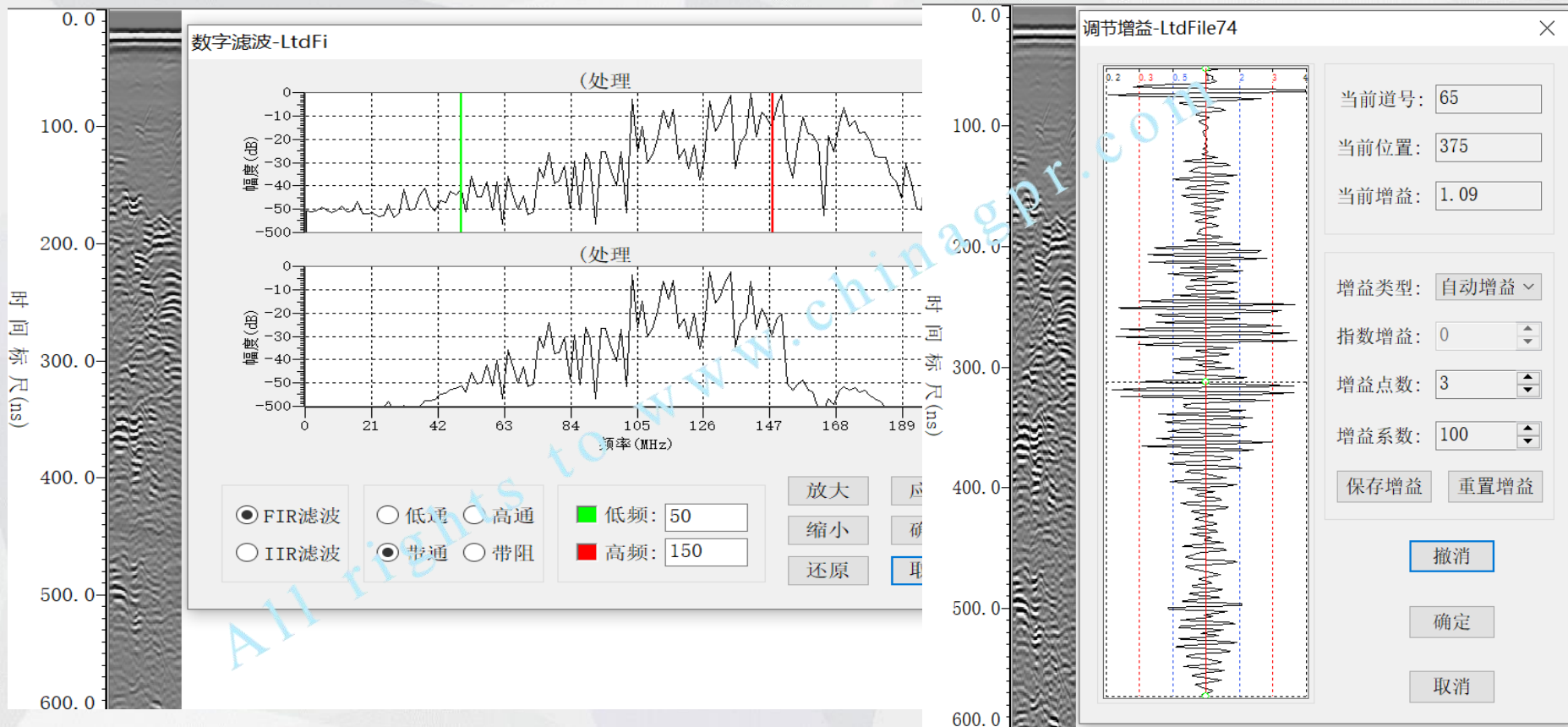




## 2.4 数据分析

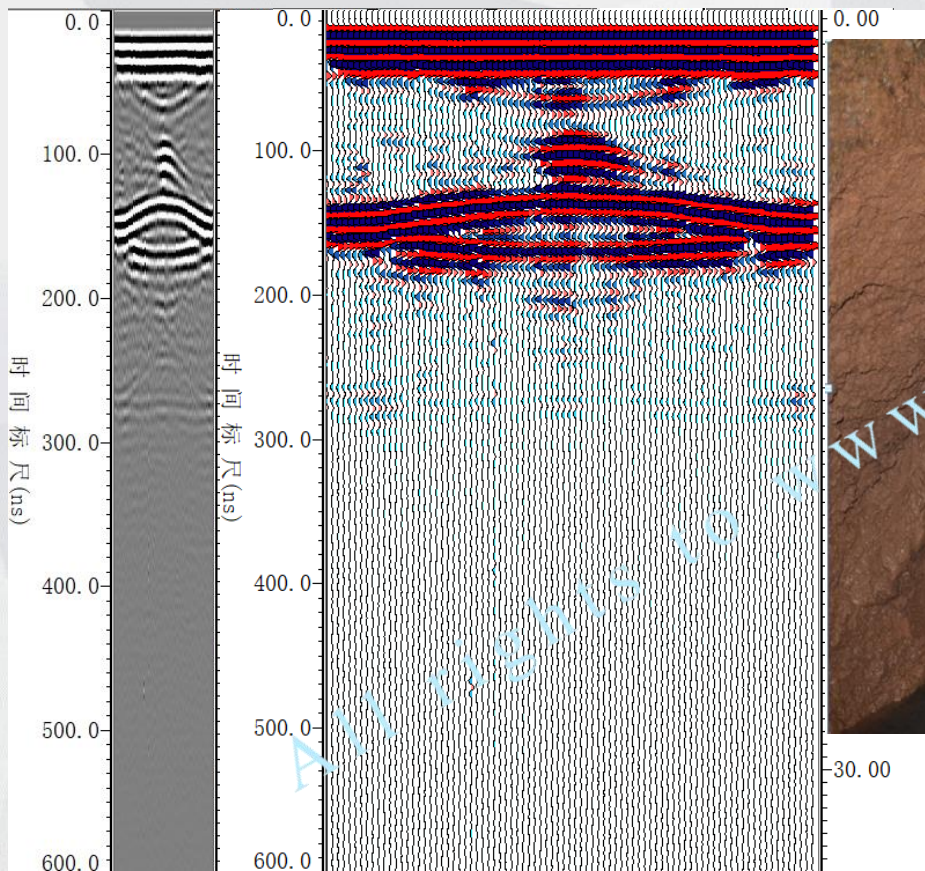


## 2.4 数据分析





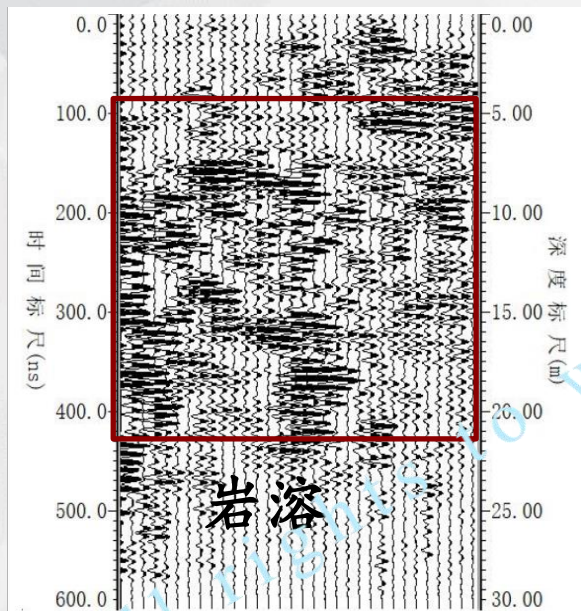
## 2.4 数据分析



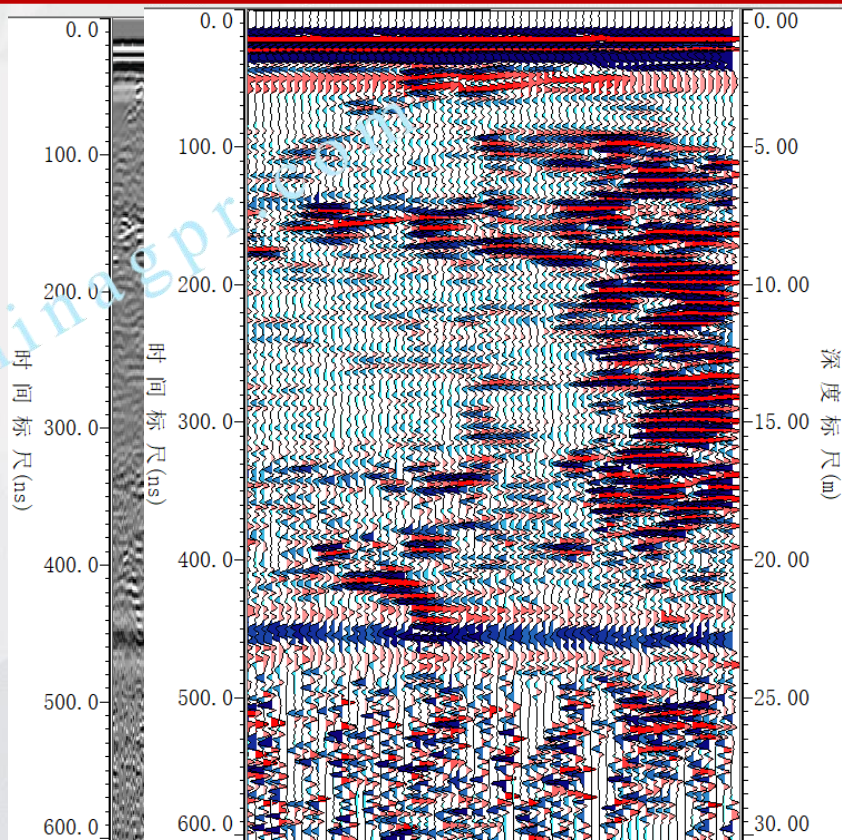
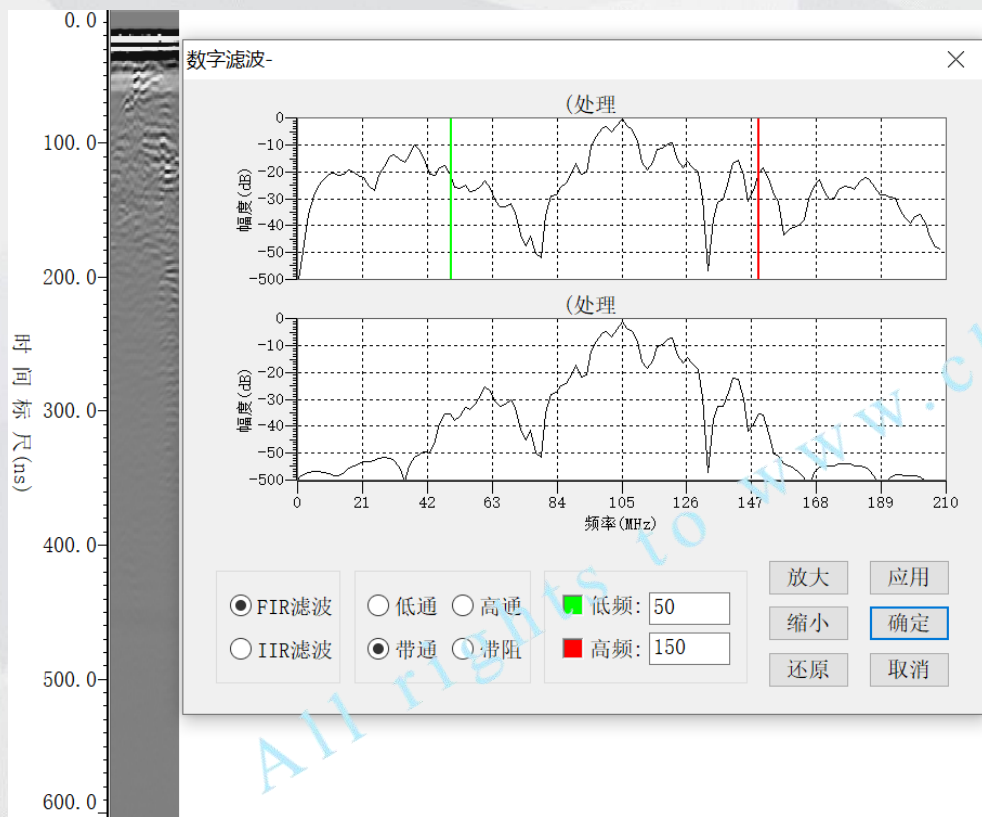
地下暗河



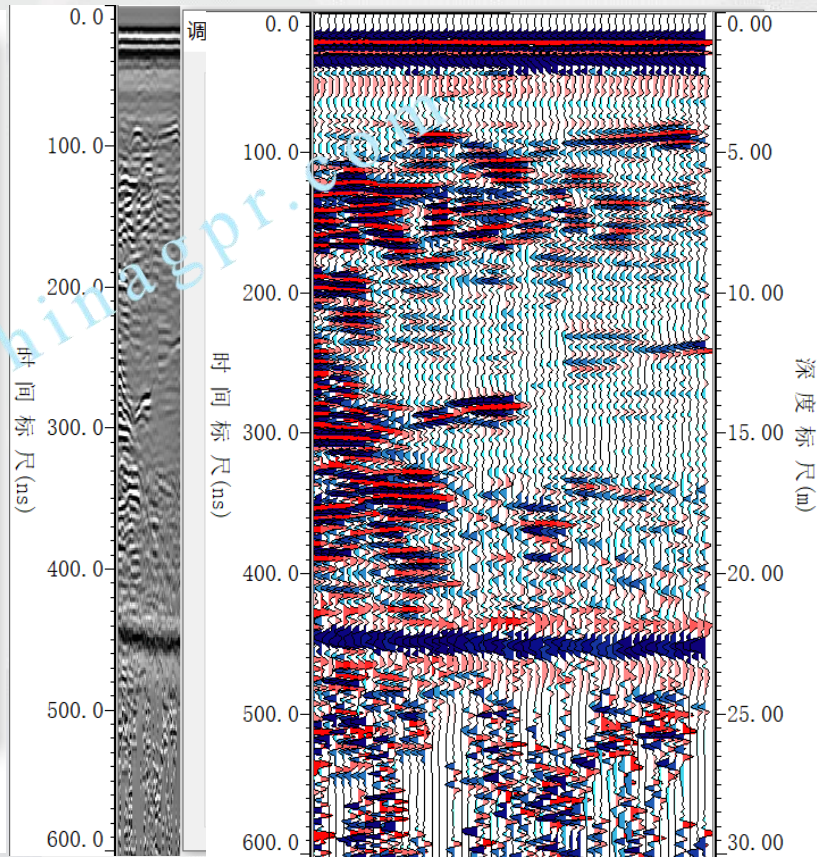
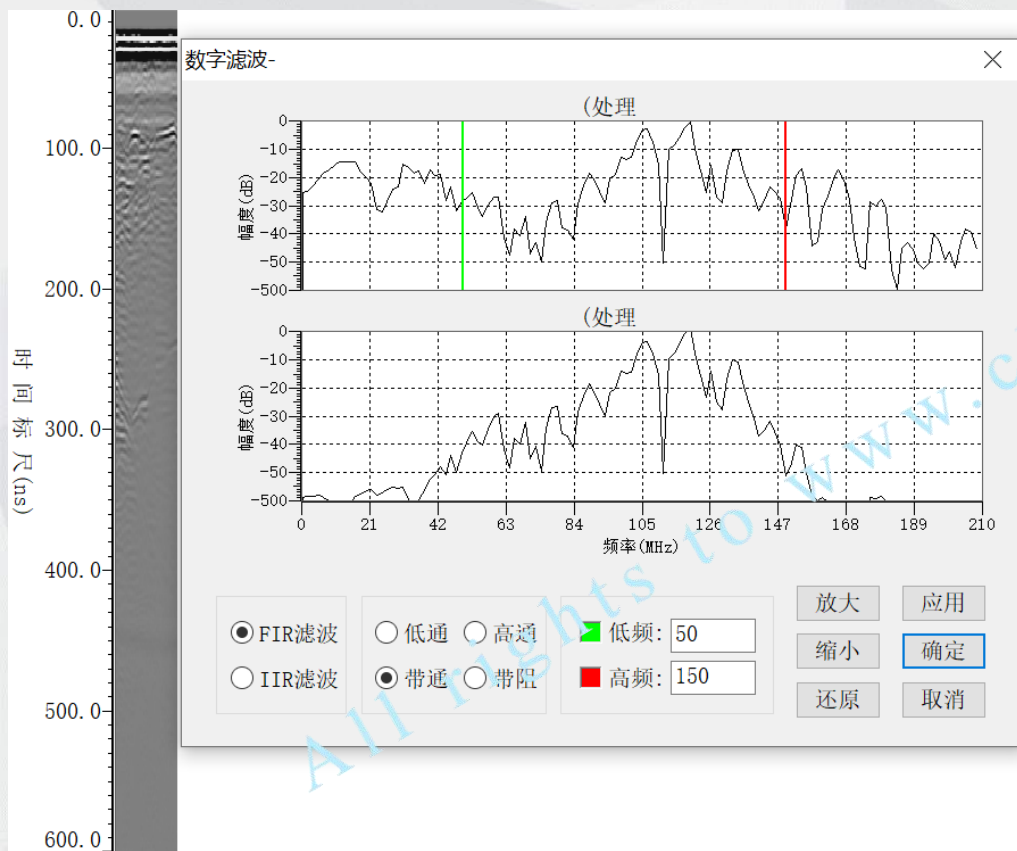
## 2.4 数据分析



## 2.4 数据分析



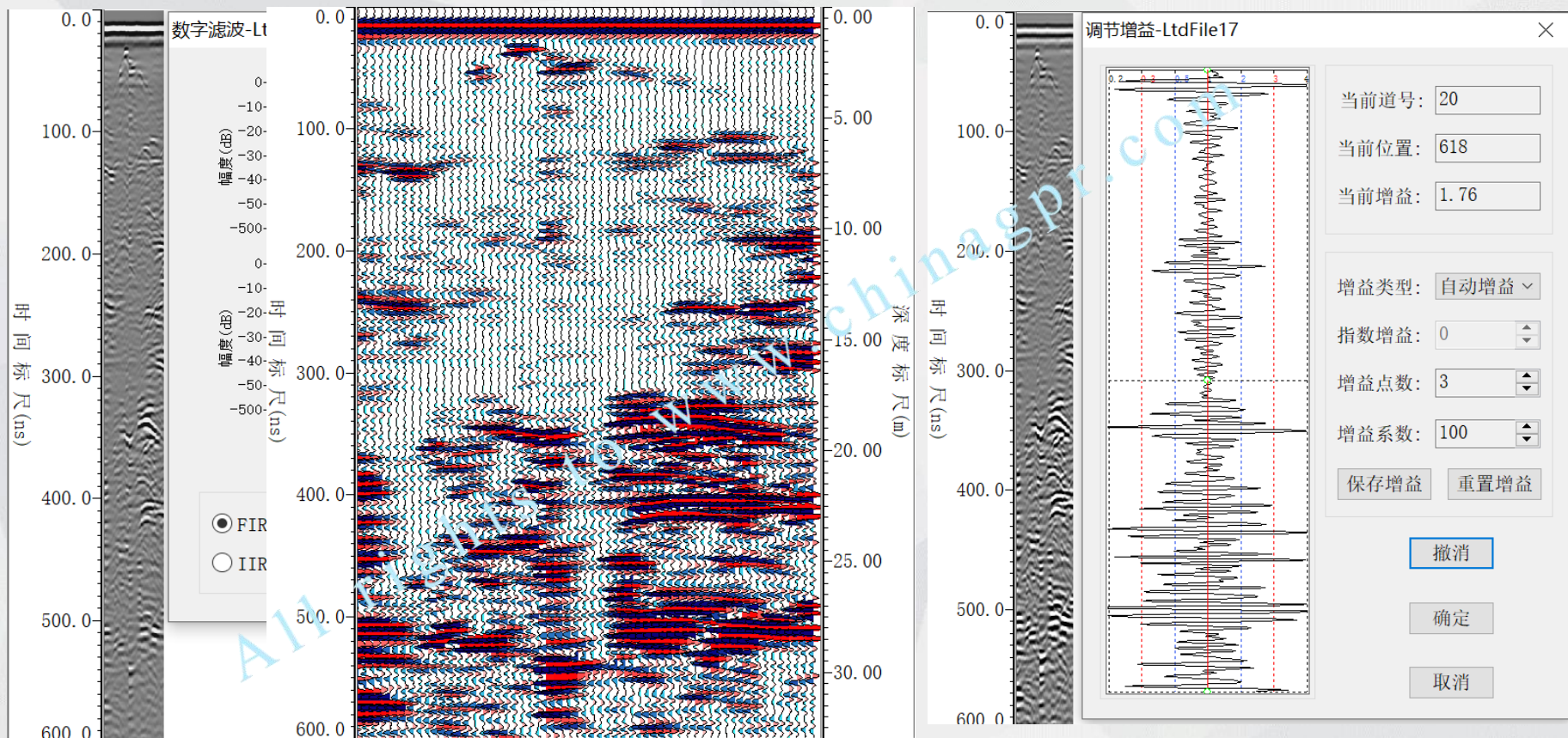
## 2.4 数据分析



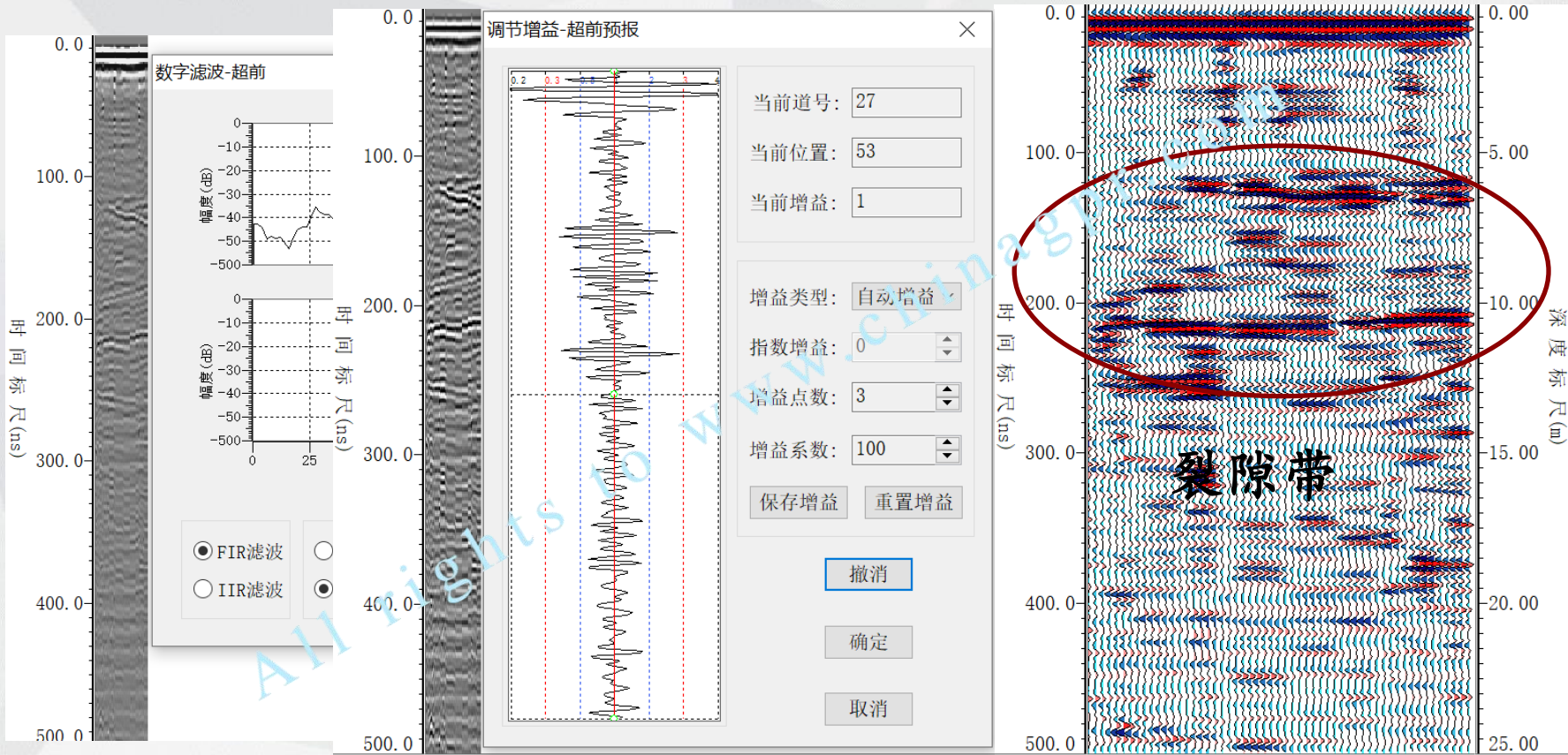




## 2.4 数据分析

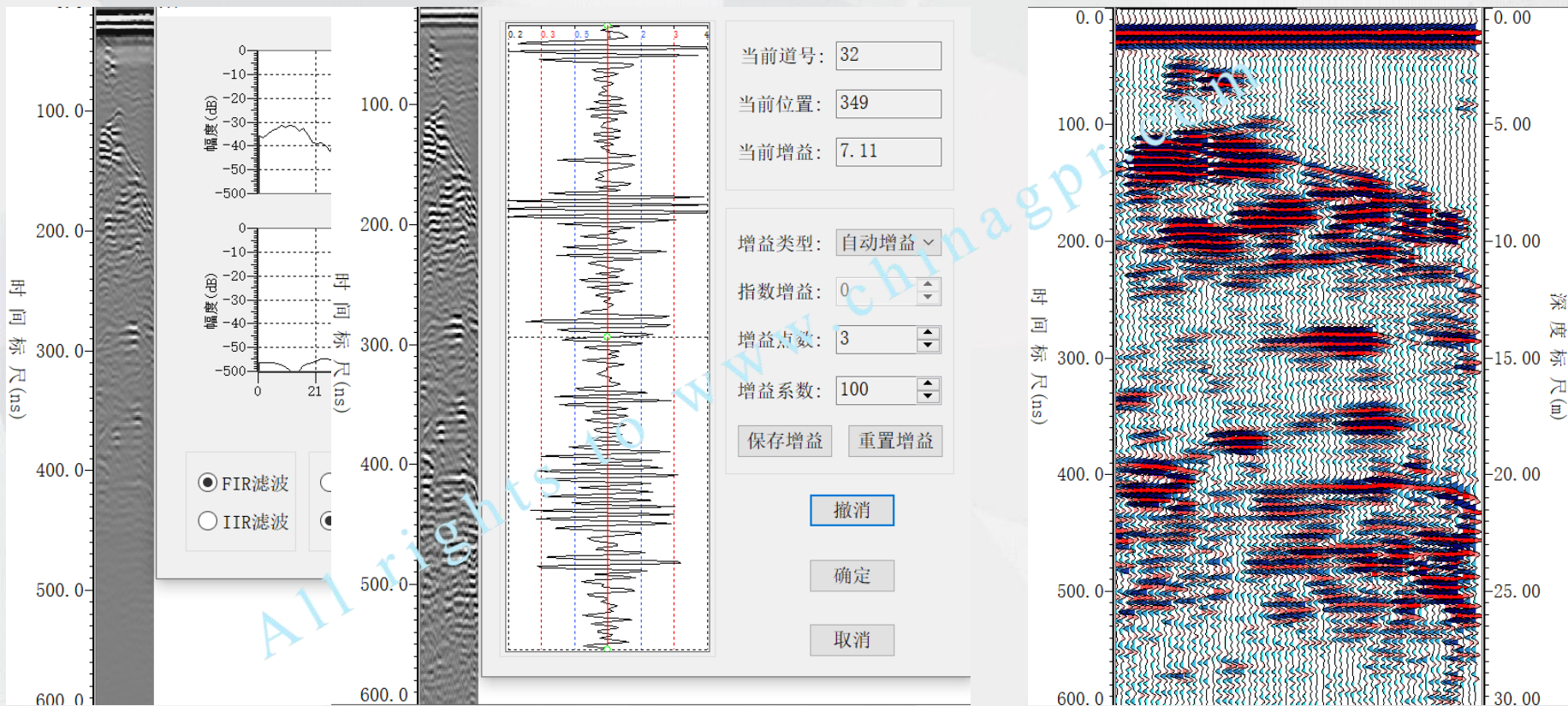


## 2.4 数据分析

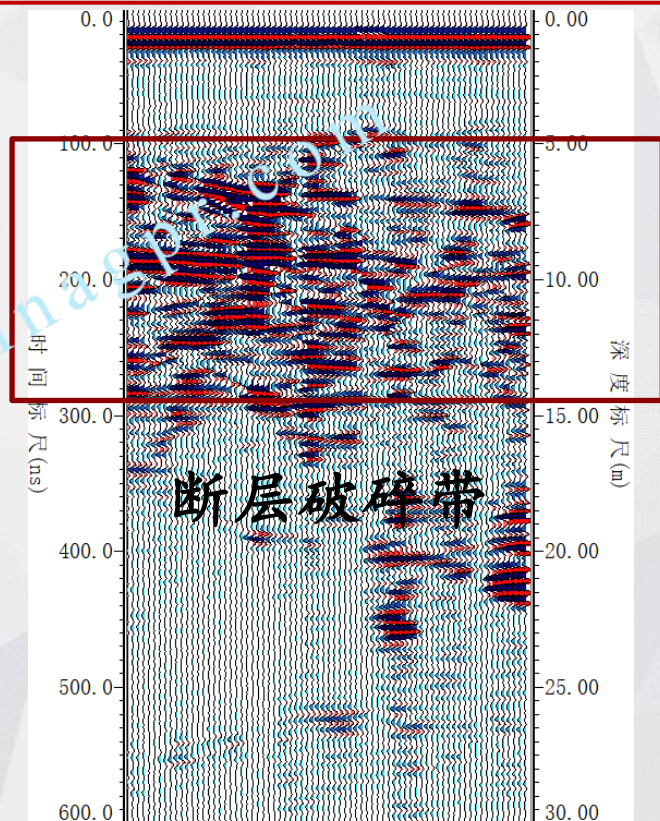
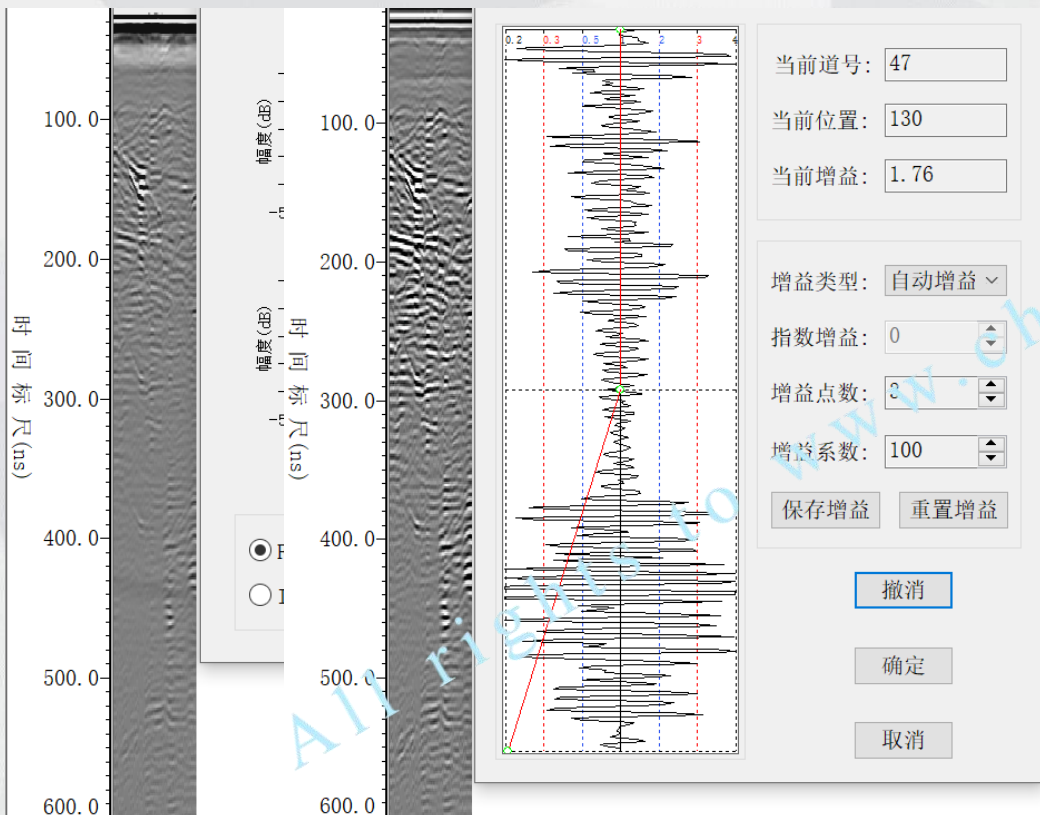




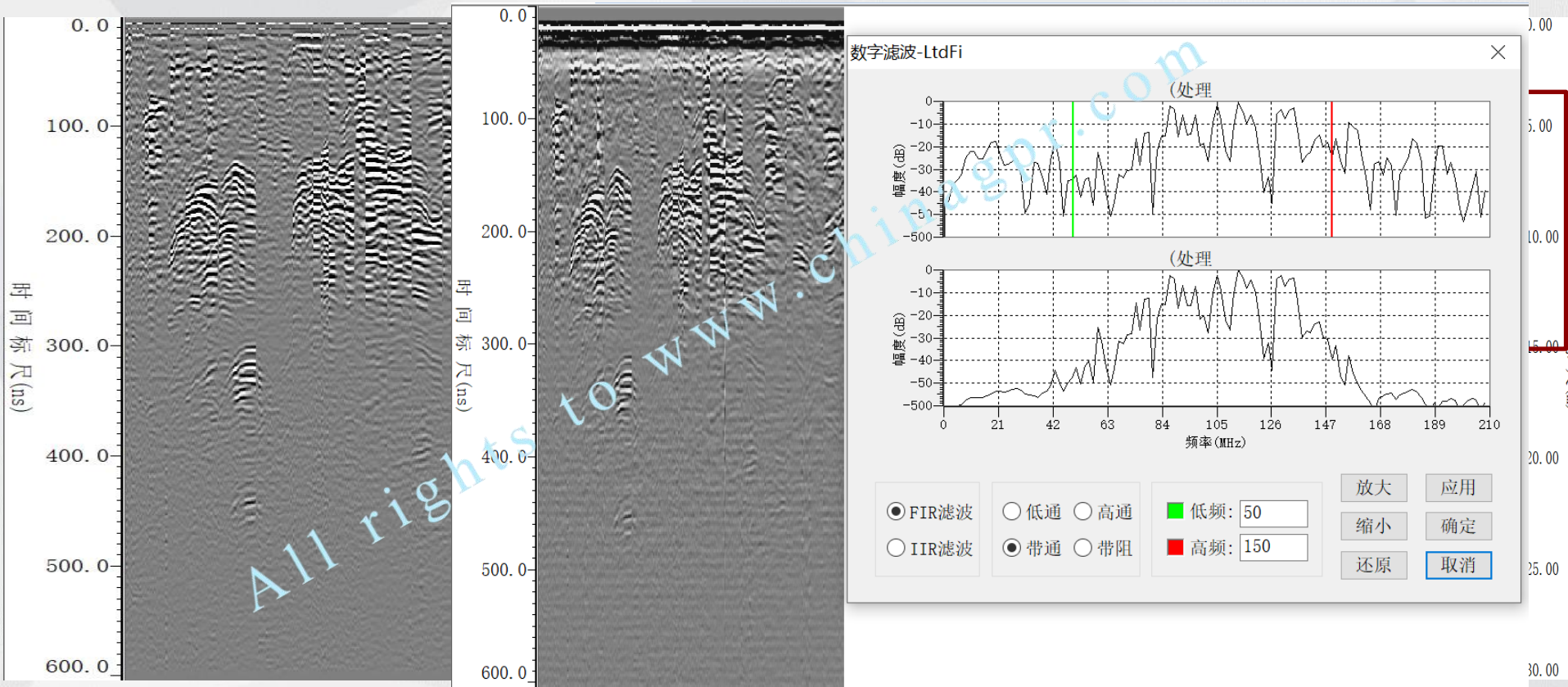
## 2.4 数据分析



## 2.4 数据分析

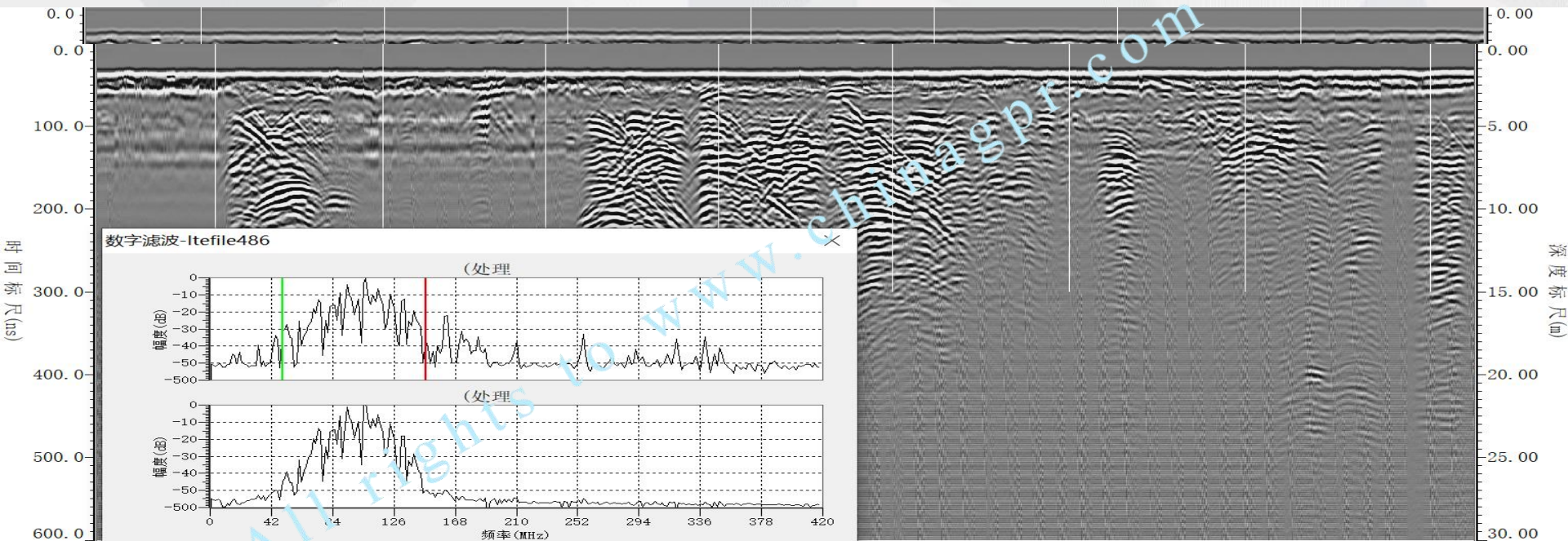


## 2.4 数据分析





## 2.4 数据分析



填方路基岩溶探测，异常区域为？

## 总结 and 展望：多传感器智能感知



- 多通道探地雷达主机、400MHz、150MHz天线；
- 隧道顶拱、边墙和仰拱同步检测；
- 配接三路高清视频摄像机。

# 基建+AI+DT → 隧道施工、质量控制、运行监控、预警决策



万物互联





# 众人拾柴火焰高!

Making light work, we together!

CETC 中国电科

责任 创新 卓越 共享

Responsibility  
Innovation

Excellence  
Shared

- 下期预告（4月16日晚八点）：
- 讲座题目：GPR05-地下管线探测方法
- 信息发布网站：[www.chinagpr.com](http://www.chinagpr.com)