



中国石化  
SINOPEC

## MATLAB深度学习在智能地震反演中的应用

杨培杰, 中国石化胜利油田勘探开发研究院



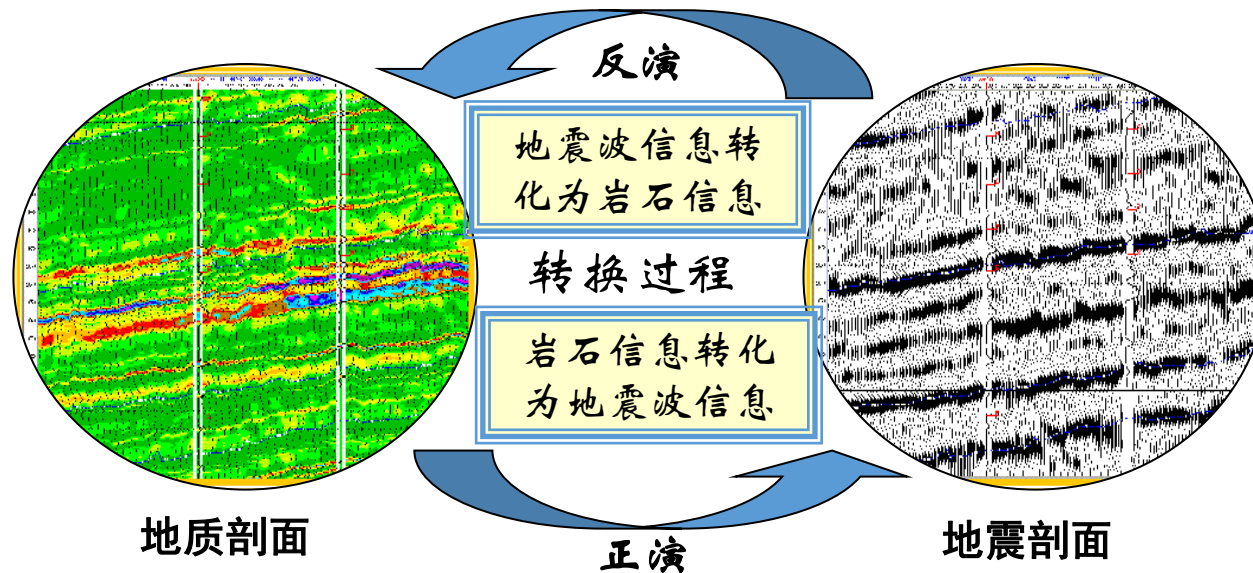
MATLAB EXPO

# Contents

## 目录

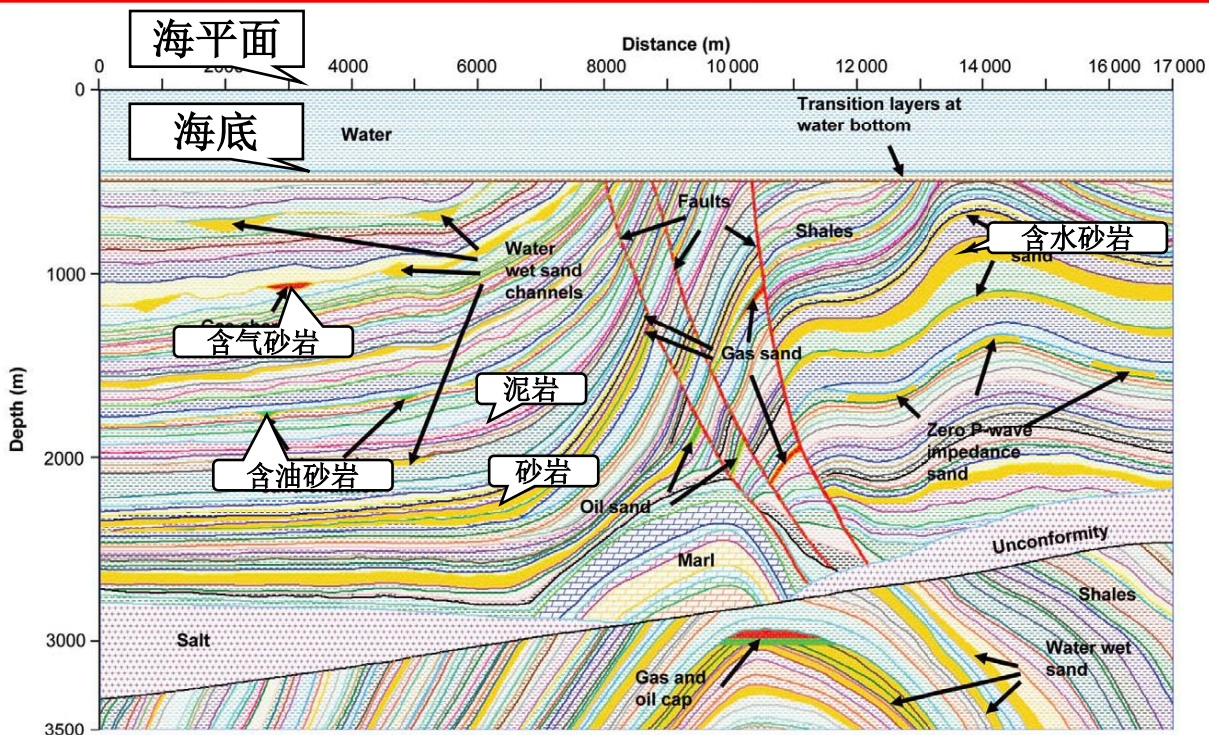
- 一、问题的提出**
- 二、储层频相特征分析**
- 三、频相智能反演方法**

# 地震反演简介



地震反演的一个主要目的把**界面型地震剖面**变成了**岩层型地质剖面**。

# 地震反演简介



Marmousi2地质模型

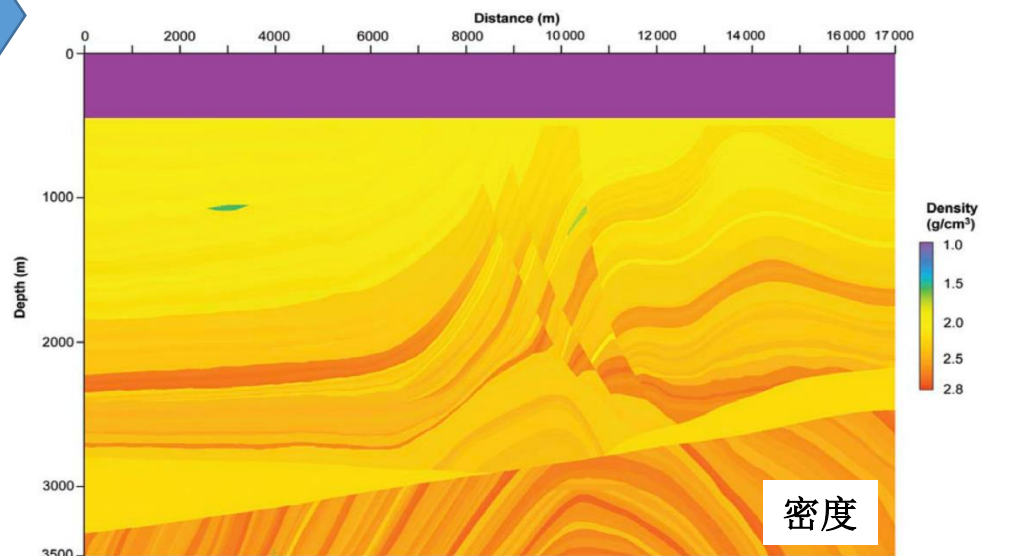
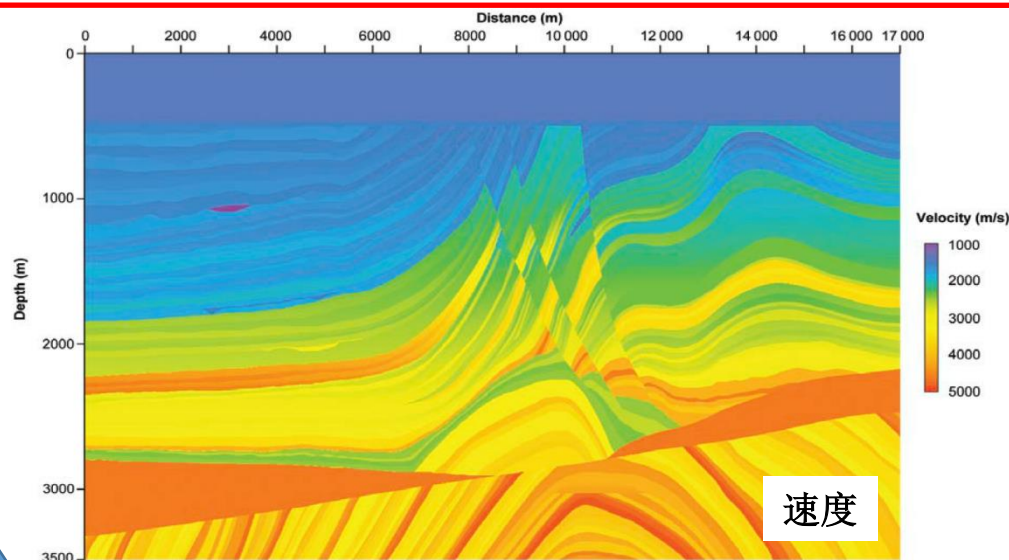


地质模型主要参数:

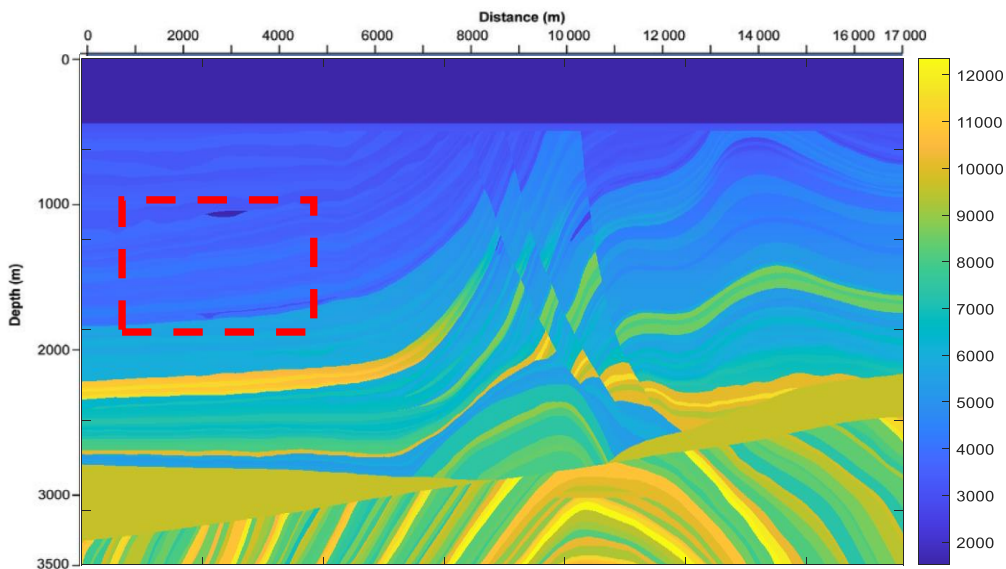
**岩性:** 砂岩、泥岩、碳酸盐、火成岩等

**物性:** 孔隙度、渗透率、饱和度

**流体:** 油、气、水    **构造:** 断裂系统

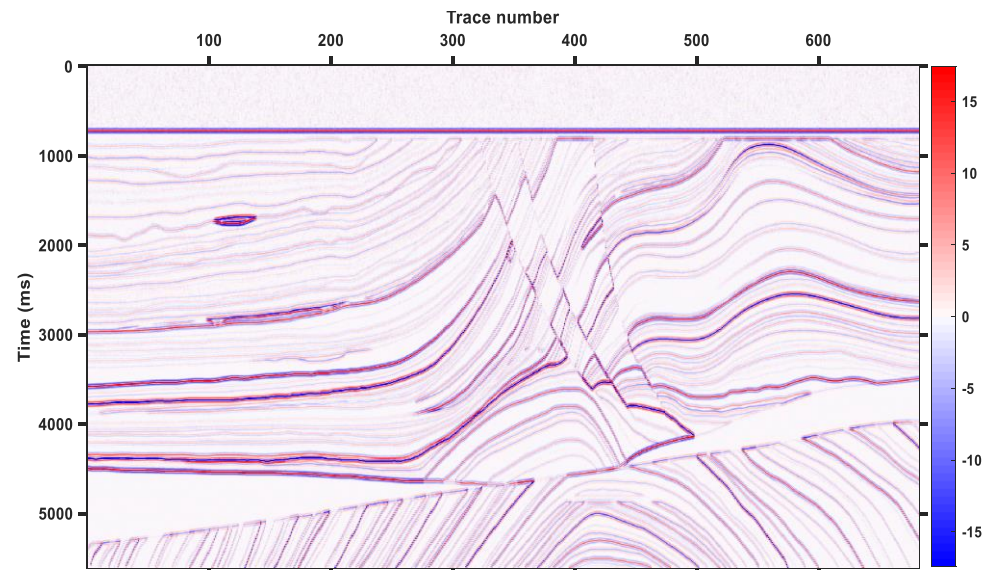


# 地震反演简介



Marmousi2模型（纵波阻抗）

纵波阻抗=纵波速度\*密度，如某个地层的纵波速度=2500米/秒，密度=2.4克/立方厘米，则波阻抗=6000 m\*s<sup>-1</sup>\*g\*cm<sup>-3</sup>



Marmousi2模型正演地震记录（褶积模型法）

地震正演方法:

1.波动方程法

$$V^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

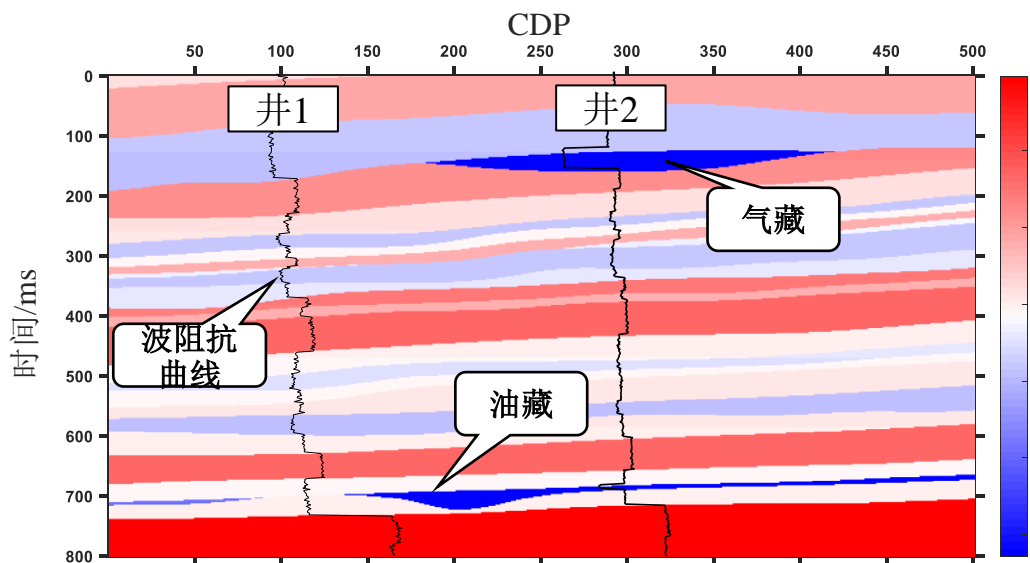
2.射线追踪法

$$\frac{d}{ds} \left[ \frac{1}{c(r)} \frac{dr}{ds} \right] = \nabla_r \left[ \frac{1}{c(r)} \right]$$

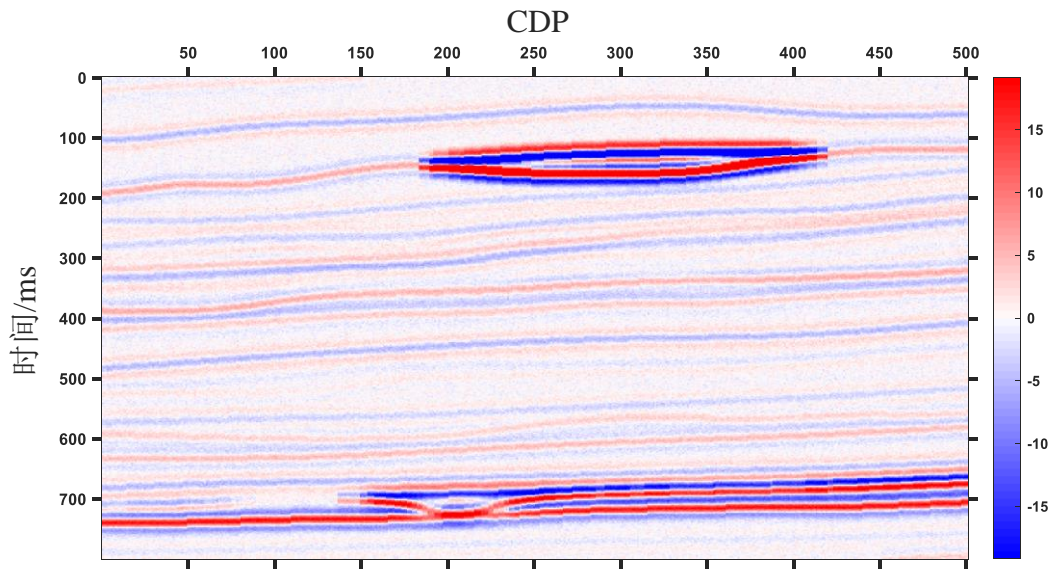
3.褶积模型法

$$D = W * R + n$$

# 地震反演简介



Marmousi2模型（部分）



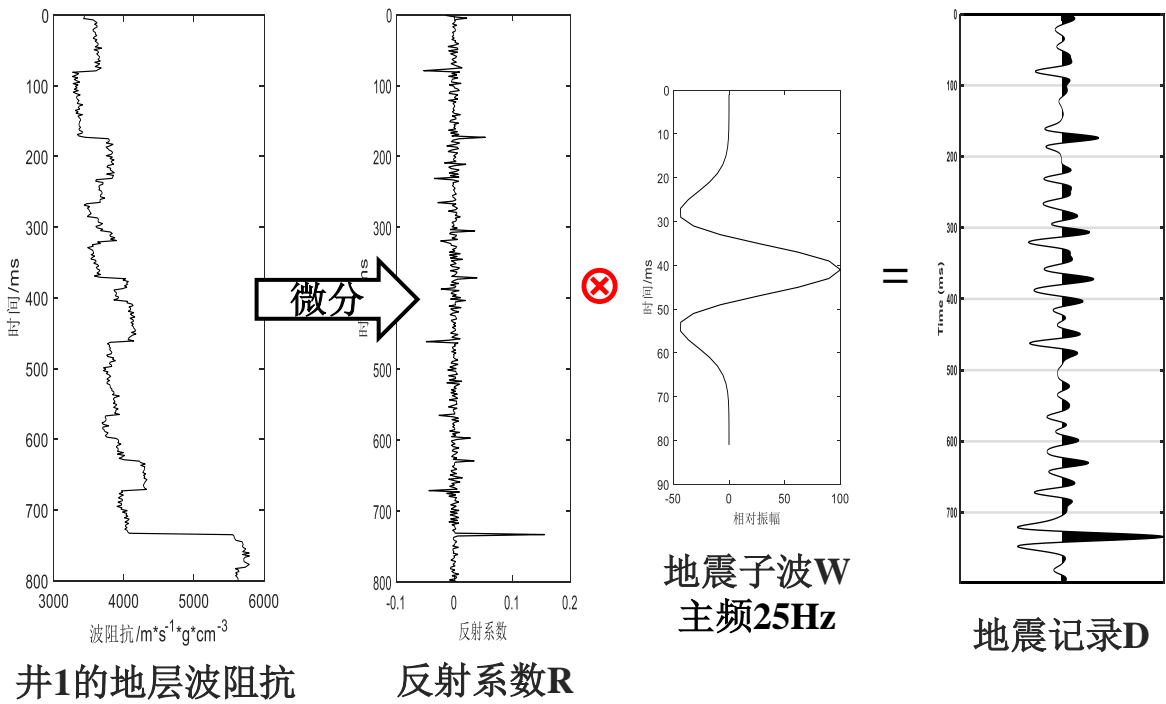
Marmousi2模型地震响应（部分、叠后）

如何从地震数据  
得到地层参数？

抽取图中的井1、井2 作为已知井

地震正演结果的地震数据降低了对地质体的分辨率，类似于图像处理中的图像模糊。

# 地震反演简介

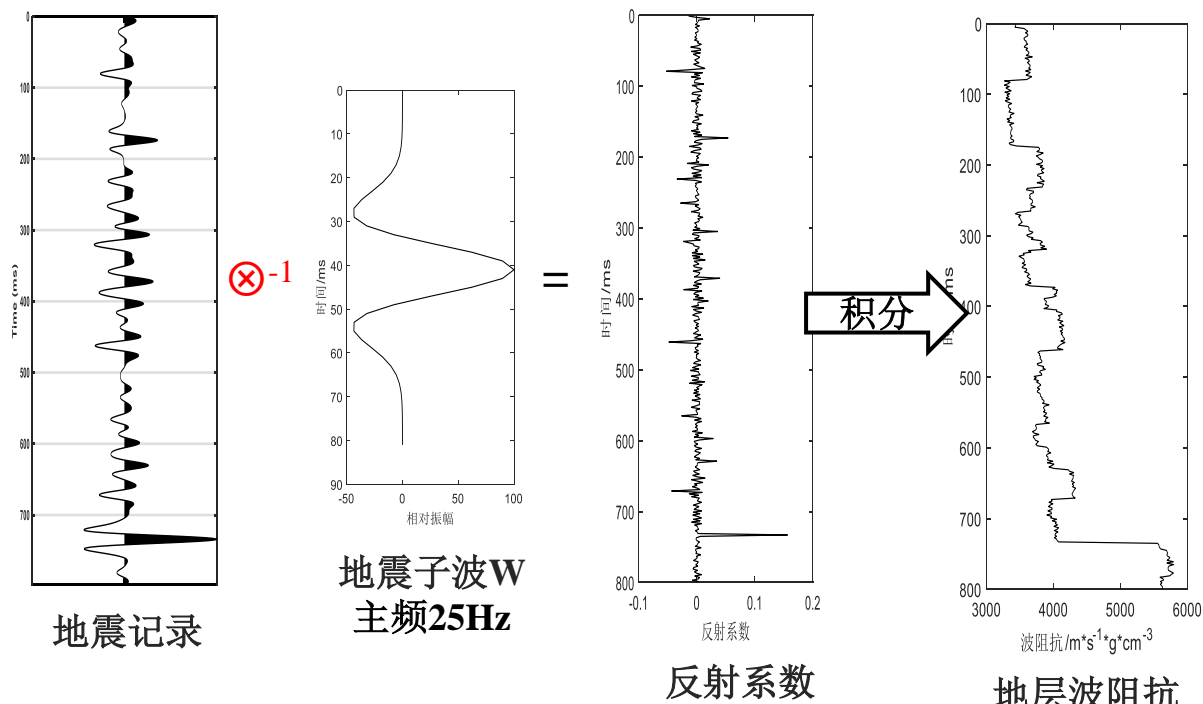


地震正演 (1D)

褶积模型地震正演:

$$D = W \otimes R + n$$

地震数据    地震子波    反射系数    噪声



地震反演 (1D)

⊗: 表示卷积    ⊗⁻¹: 表示反卷积

# 地震反演简介

## 模型驱动反演:

正演公式:

$$D = W \otimes R + n$$

地震数据      地震子波      反射系数      噪声

求解思路1——最小目标函数法:

$$\min \|W \otimes R - D\|^2 + \mu \|R\|^2$$

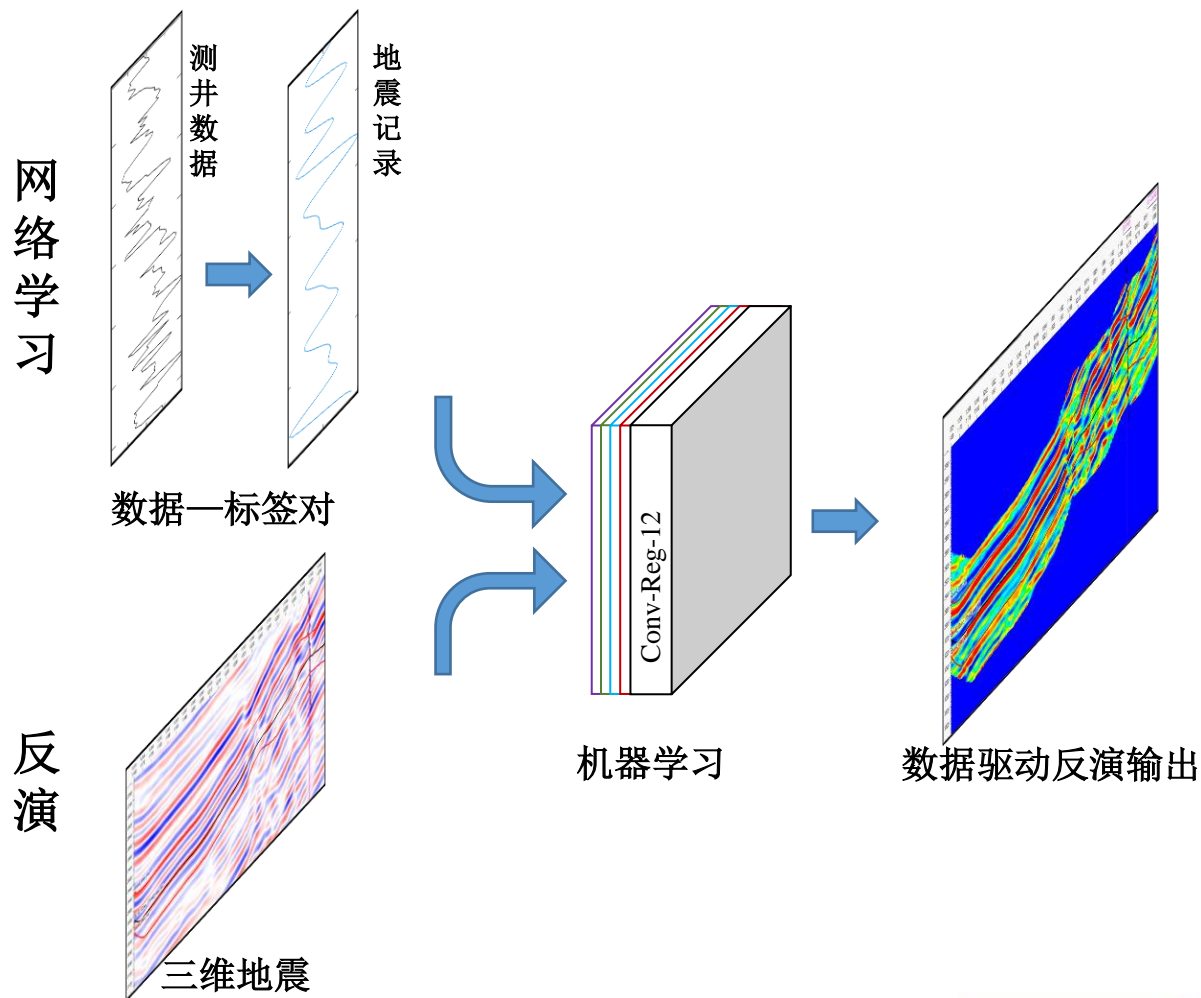
不足: **无法**加入先验信息、各种约束信息

求解思路2——最大后验法:

$$\text{Max} \{ p(x_i | d) \}$$

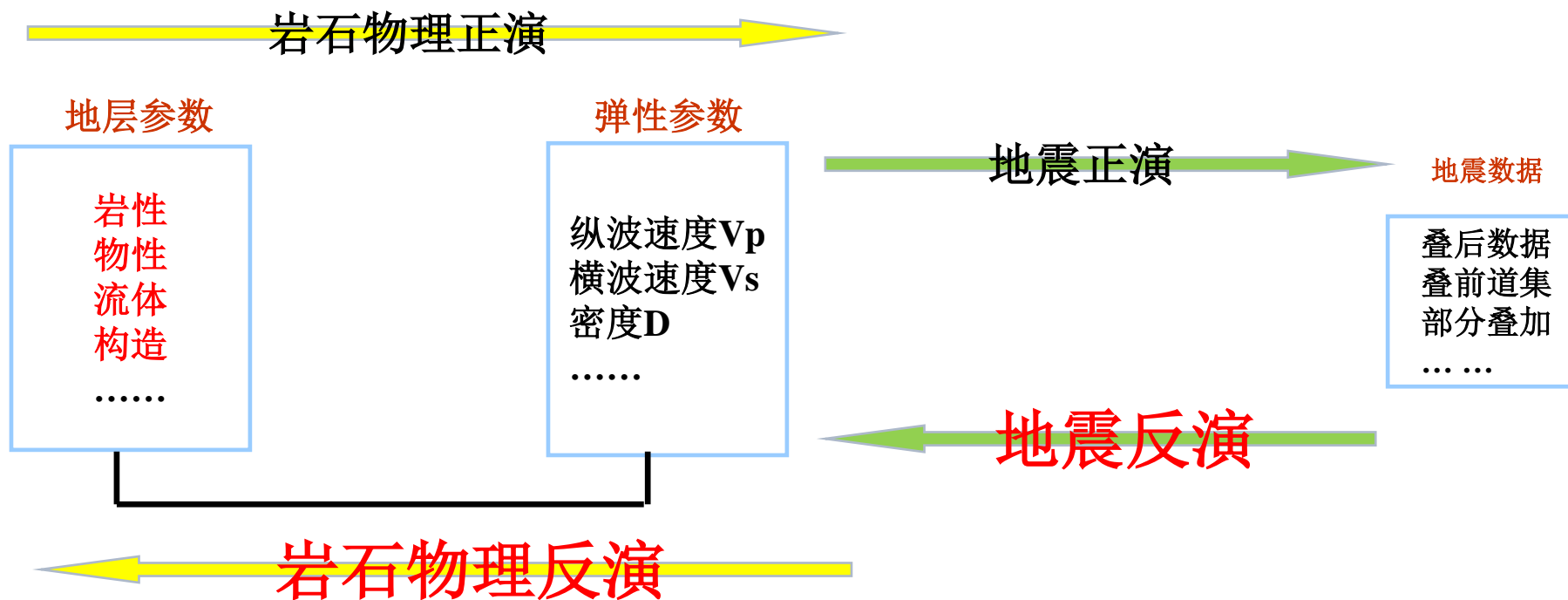
优势: **能够**加入先验信息、各种约束信息

## 数据驱动反演:





# 地震反演简介



**地震反演：**由可观测的地震数据得到纵横波速度和密度  
**岩石物理反演：**由储层弹性参数得到储层物性、流体参数

# 项目背景

## 典型（叠后）反演技术及特点：

按反演结果分类		计算方法	反演方法	特点	主要商业软件
1	地震反演	直接反演	道积分	<ul style="list-style-type: none"> <li>褶积模型</li> <li>相对阻抗</li> </ul>	Vlog、Seislog Verilog等
			递推反演		
		迭代反演	广义线性反演	<ul style="list-style-type: none"> <li>褶积模型</li> <li>有宽带(井)约束</li> <li>迭代寻优</li> <li>绝对阻抗</li> <li>地震起主导作用</li> <li>分辨率达不到井</li> </ul>	Strata、 Jason_Invertrace ISIS GeoScope
			宽带约束反演		
			稀疏脉冲反演		
		模拟退火反演			
		波阻抗多尺度反演			
2	模型反演	非迭代反演	波形指示反演	<ul style="list-style-type: none"> <li>井资料统计规律</li> <li>模型建立准确性</li> <li>储层精细刻画</li> <li>平面效果不连续</li> </ul>	Petrel Jason_Invermod Jason_StratMod GeoScope_AI
			地质统计学反演		
			神经网络反演方法		

1.地震反演多是模型驱动的； 2.主要使用地震的振幅谱； 3.受井插值模型的影响较大； 4.分辨率往往较低。

# 项目背景

如何将地震频相特征(频:振幅谱;相:相位谱)相结合, 实现更为精细的储层预测(波阻抗反演、伽玛反演、孔隙度反演等)具有重要的意义。频、相信息的联合应用, 可以大大降低反演的多解性, 提高储层预测的精度和可靠性。

## 问题与对策:

1.地震反演多是模型驱动的

对策: 数据驱动

2.主要使用地震的振幅谱

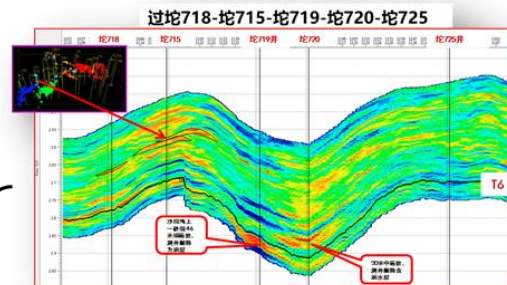
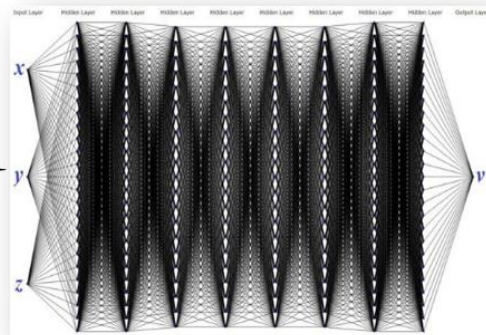
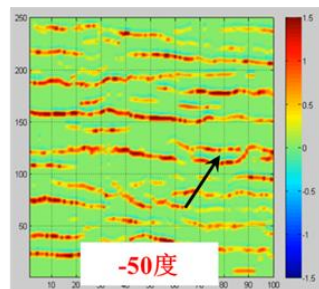
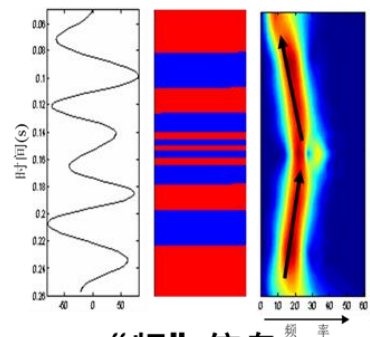
对策: 频相信息融合应用

3.受井插值模型的影响较大

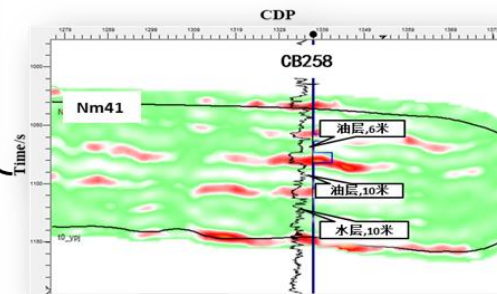
对策: 不使用井插值模型

4.分辨率往往较低

对策: 深度学习提高分辨率



波阻抗数据体



孔隙度数据体

基于数据驱动的地震频相特征提取与人工智能地震反演: 频相智能反演

# Contents

## 目录

- 一、问题的提出
- 二、储层频相特征分析
- 三、频相智能反演方法

# 储层频相特征分析

## 1. 改进的约束最小二乘时频分析(I-CLS)

### (1) 目标函数的建立:

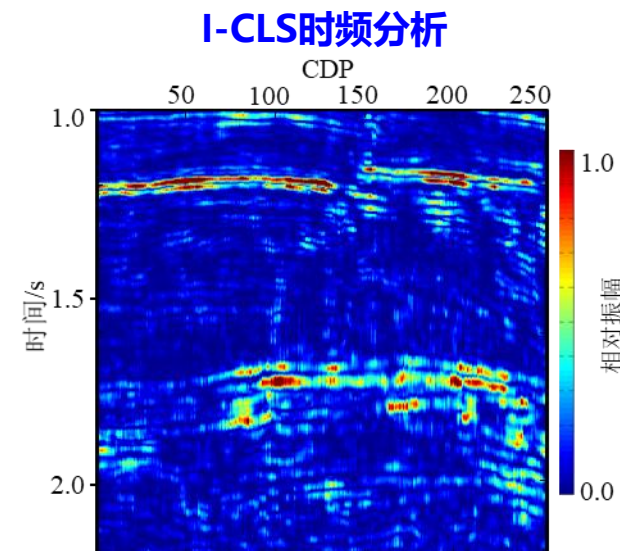
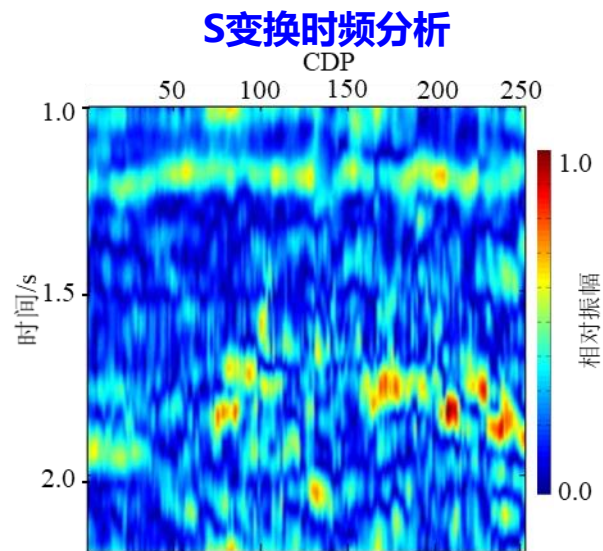
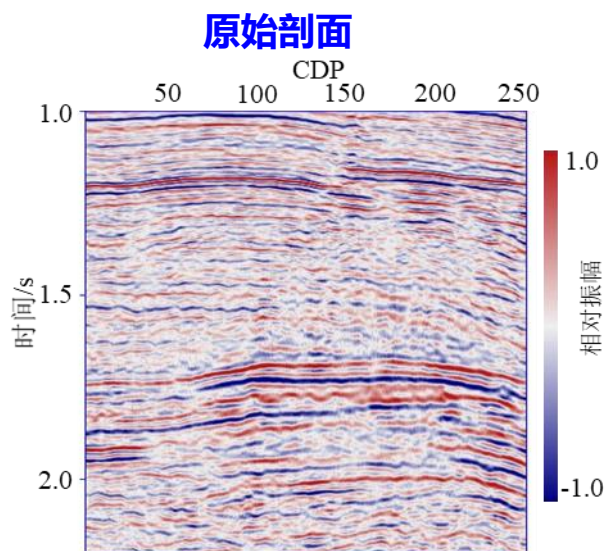
$$d = S \cdot h + e \Rightarrow \|S \cdot h - d\|_2^2 + \mu \|h\|_2^2 \Rightarrow \min$$

其中,  $h$ 表示待求的频谱向量,  $d$ 表示加窗的地震数据,  $S$ 表示不同频率的三角函数构成的矩阵,  $e$ 表示误差。

### (2) 目标函数的求解:

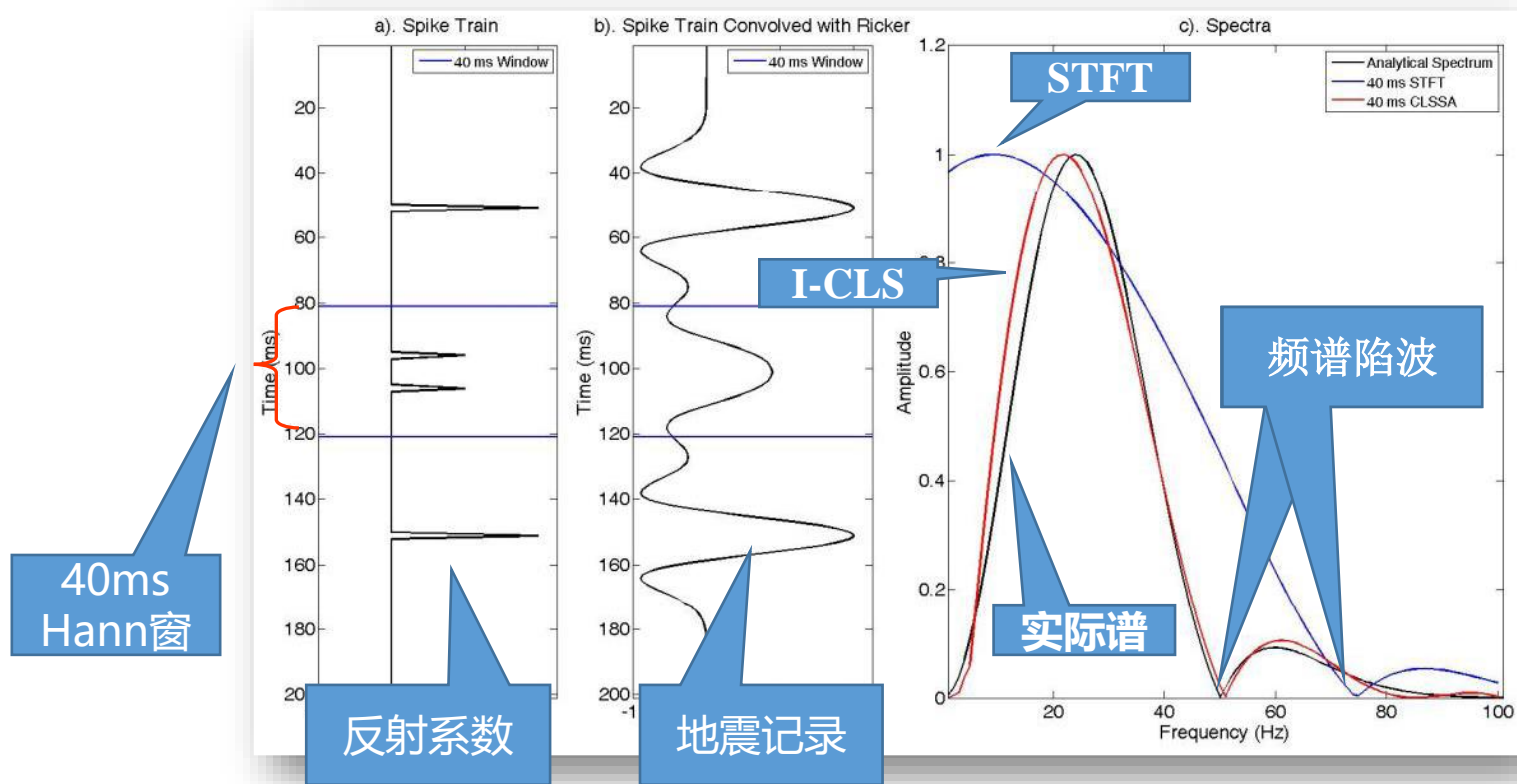
$$h_e = S_w' (S_w S_w' + \mu \Omega)^{-1} d_w$$

通过约束最小二乘法求解, MATLAB矩阵求逆。



不同时间频分析方法效果对比

# 储层频相特征分析

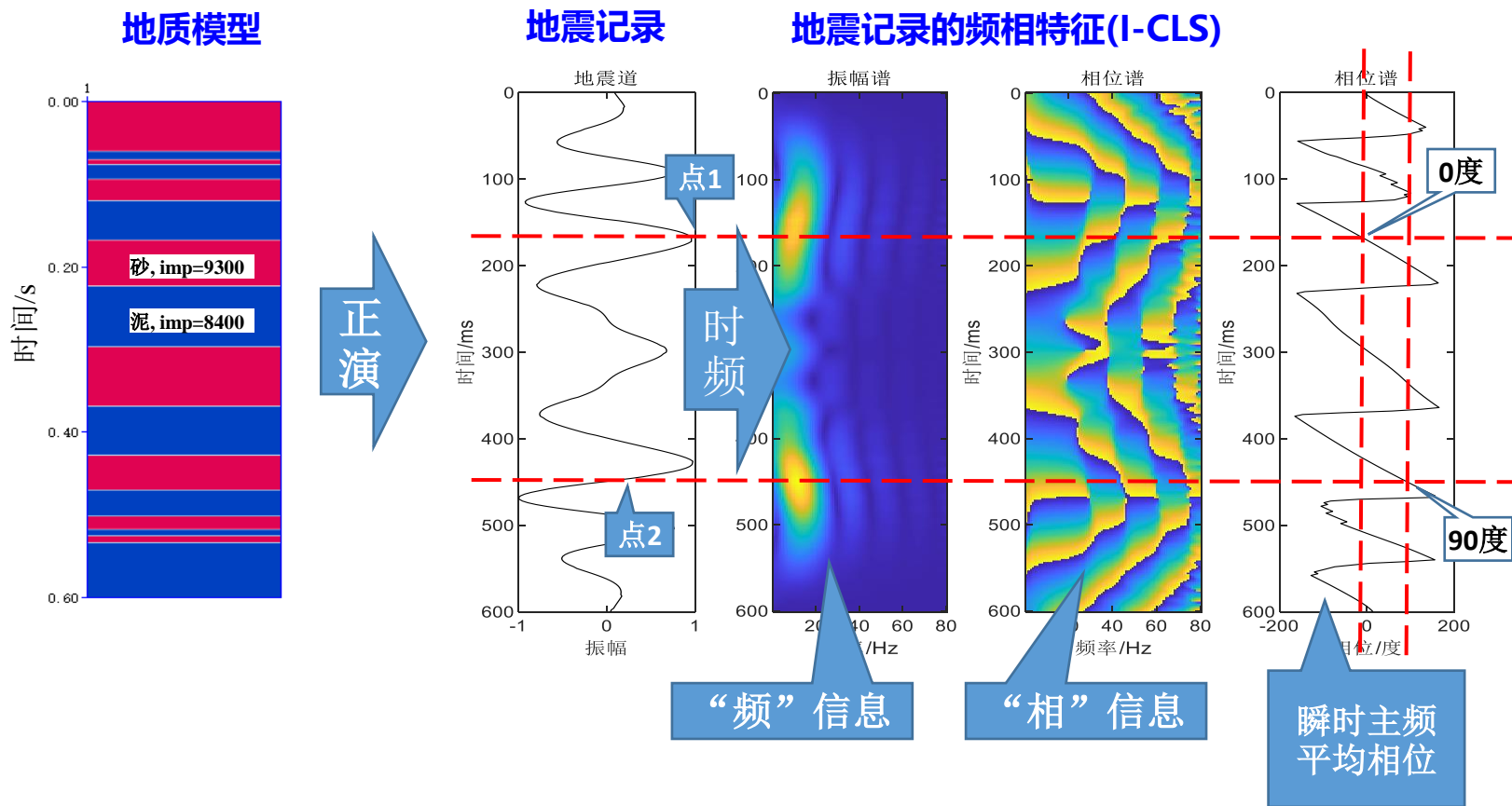


STFT时频分析与I-CLS效果对比

I-CLS时频分析的效果明显优于STFT， I-CLS能更加准确地定位频谱陷波。

# 储层频相特征分析

## 2. 频相特征提取

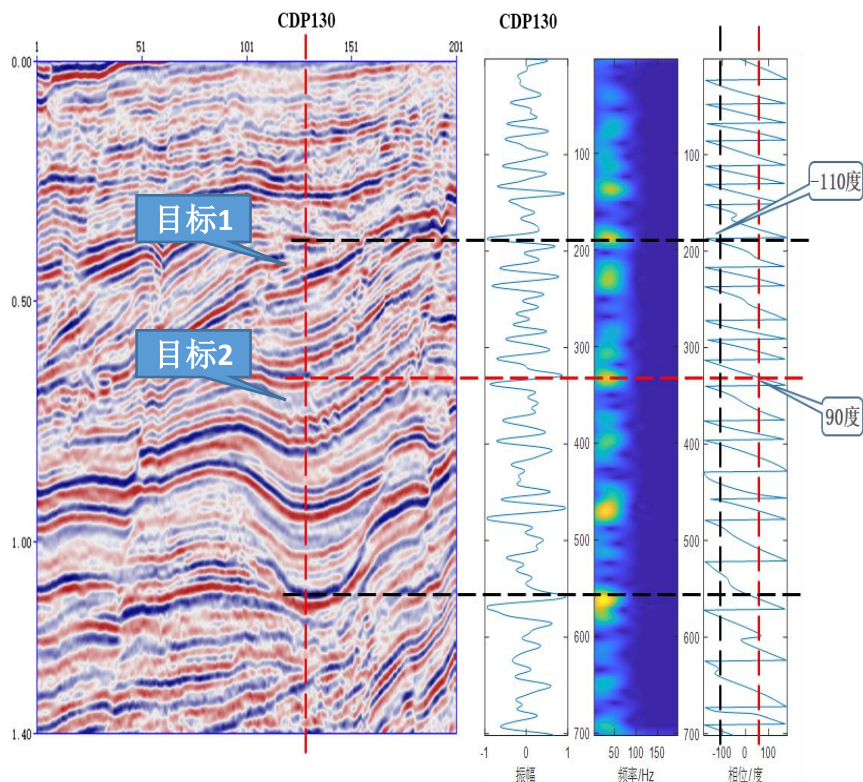


**瞬时主频平均相位：**将某时刻地震数据时频谱主频附近的相位信息进行加权叠加，一般是采用算数平均值的方法，并将该平均值作为该时刻地震数据的相位。

# 储层频相特征分析

## 3. 频相信息和地层参数的关系

实际地震频相特征分析(东营三角洲)



实际地震频相分析

### 地震频相信息的地质意义:

- (1) “频”反映了地层参数变化的快慢和强弱，“相”反映了地层不同的组合样式;
- (1) 薄层对应高频振幅，厚层对应低频振幅;
- (2) 不同组合的地层，对应不同相位的地震波形;
- (3) 在地层内部，相位一般是呈有规律的非线性变化。



# Contents

## 目录

- 一、问题的提出
- 二、储层频相特征分析
- 三、频相智能反演方法

# MATLAB深度学习

## 深度学习 workflow

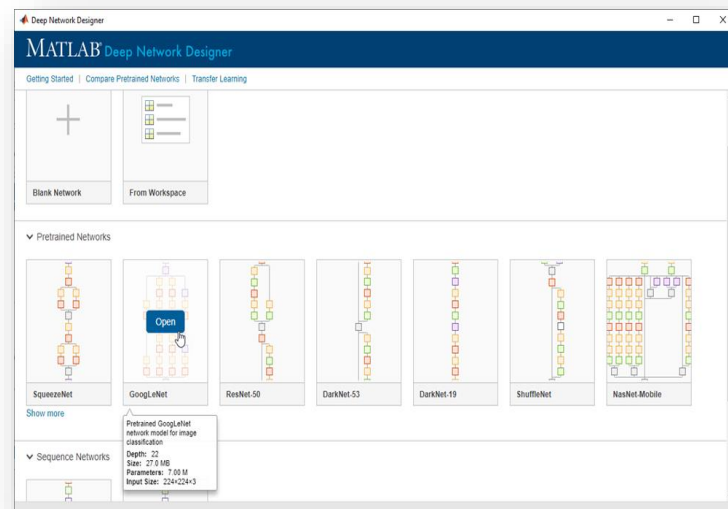


## 深度学习流程

# MATLAB深度学习

```
[learnableLayer,classLayer] = findLayersToReplace(lgraph);  
numClasses = 100;  
if isa(learnableLayer,'nnet.cnn.layer.FullyConnectedLayer')  
    newLearnableLayer = fullyConnectedLayer(numClasses, ...  
        'Name','new_fc', ...  
        'WeightLearnRateFactor',10, ...  
        'BiasLearnRateFactor',10);  
elseif isa(learnableLayer,'nnet.cnn.layer.Convolution2DLayer')  
    newLearnableLayer = convolution2dLayer(1,numClasses, ...  
        'Name','new_conv', ...  
        'WeightLearnRateFactor',10, ...  
        'BiasLearnRateFactor',10);  
end  
lgraph = replaceLayer(lgraph,learnableLayer.Name,newLearnableLayer);
```

脚本



APP

AlexNet  
VGG-16  
VGG-19  
GoogLeNet

Get started  
with these  
Models

ResNet-18      Inception-v3  
ResNet-101     DenseNet-201  
ResNet-50      Xception

Effective for object detection and  
semantic segmentation workflows

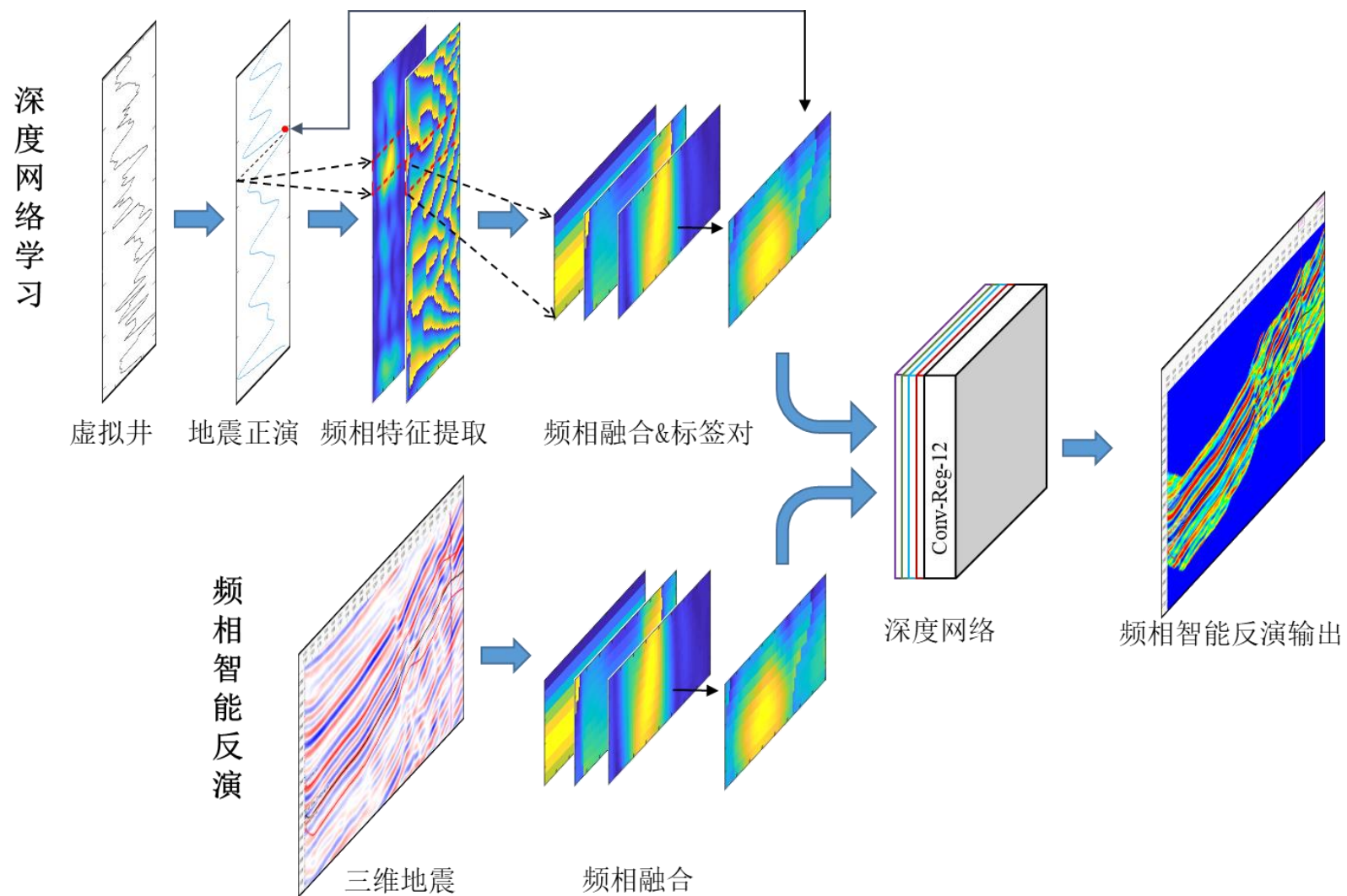
SqueezeNet  
MobileNet-v2  
ShuffleNet

Lightweight and  
computationally  
efficient

预训练网络模型

网络的搭建：可通过脚本语言或APP具体实现

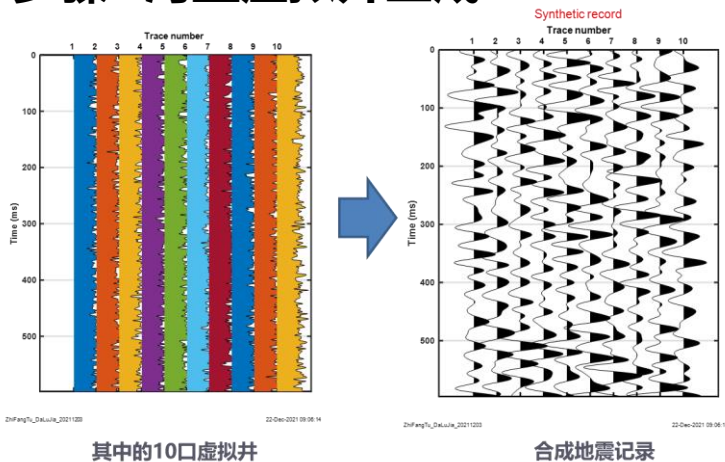
# 频相智能反演框架



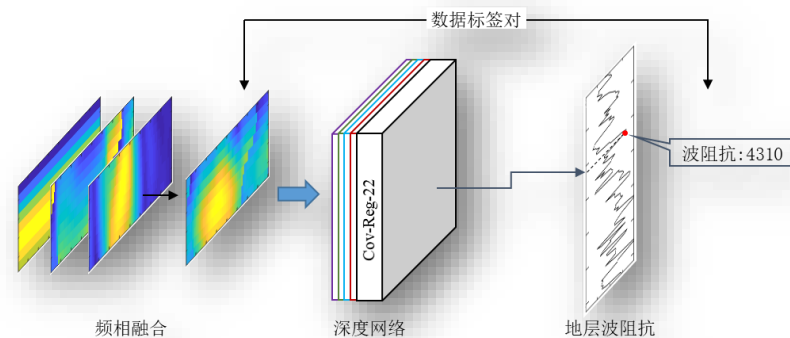
# 频相智能反演流程

频相智能波阻抗反演流程

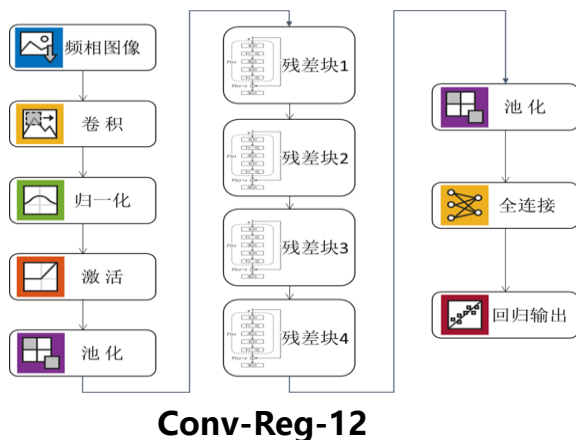
## 步骤1.海量虚拟井生成



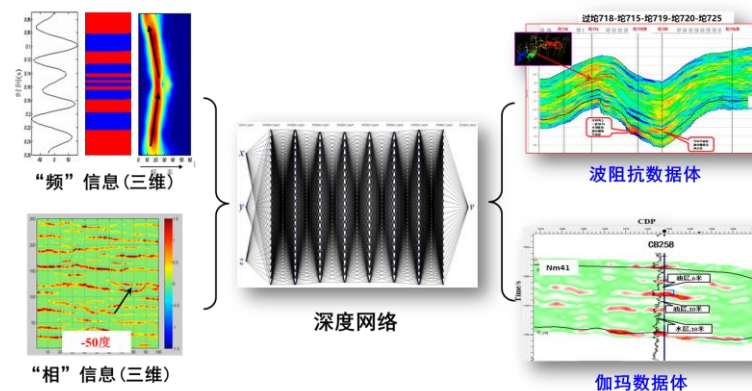
## 步骤2.地震频相信息的融合与标签制作



## 步骤3.深度网络优选与学习

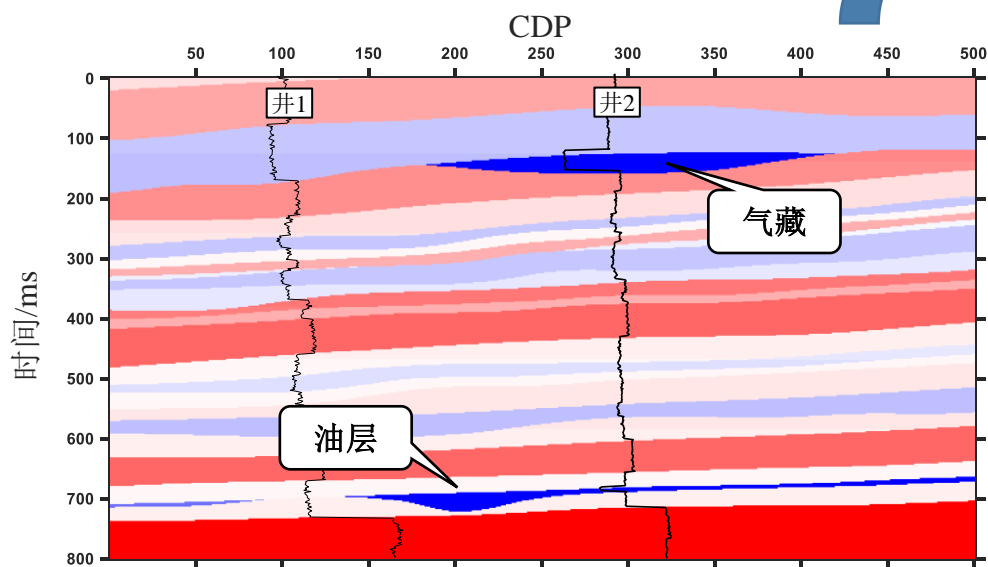


## 步骤4.频相智能反演输出



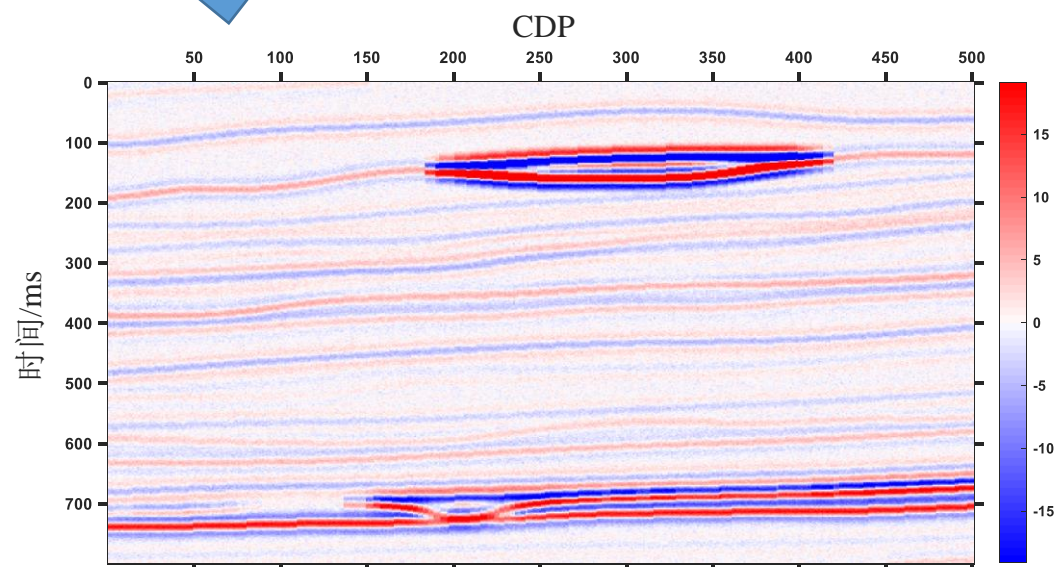
# 模型试算

## 模型试算



Marmousi2模型（部分）

正演



Marmousi2模型地震响应 (SNR=5)

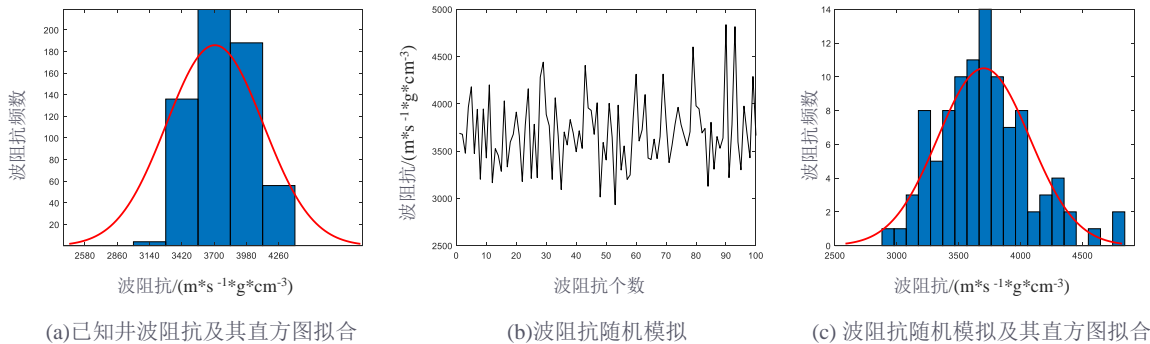
反演?

抽取图中的井1、井2 作为已知井

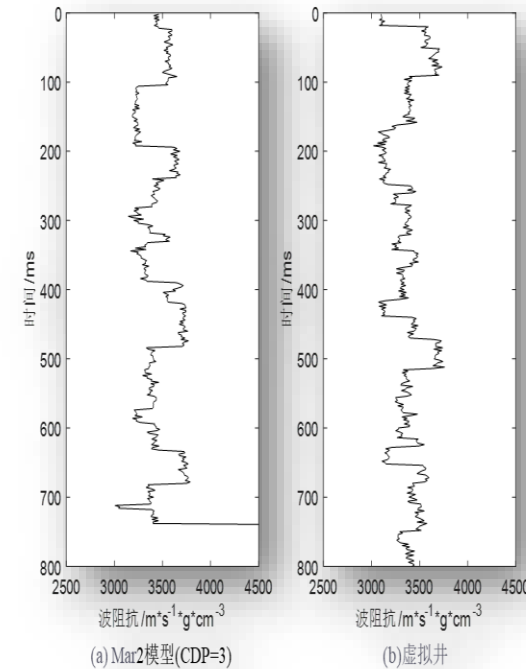
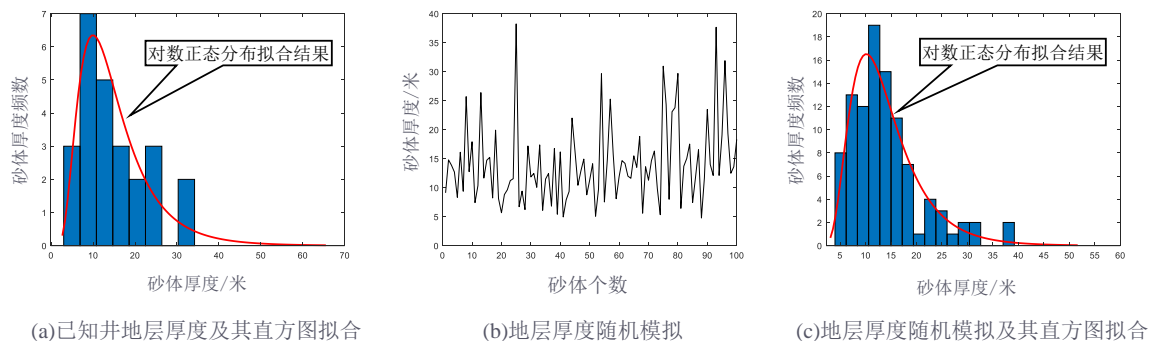
# 模型试算

## 步骤1: 海量虚拟井生成——波阻抗、砂体厚度随机模拟

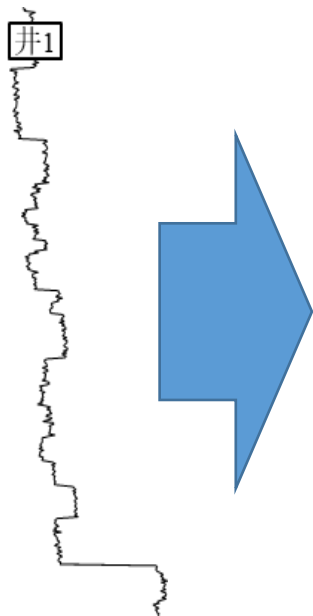
①波阻抗随机模拟: 波阻抗服从高斯分布  $f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$



②砂体厚度随机模拟: 厚度服从对数正态分布  $f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$



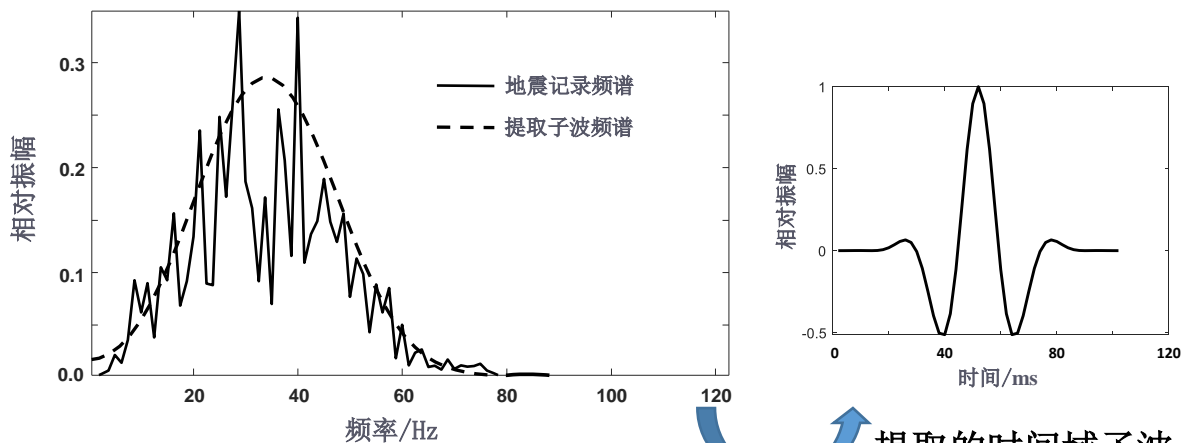
随机模拟的虚拟井波阻抗特征与模型相似。



从已知井中获得波阻抗、砂体厚度的统计信息。

# 模型试算

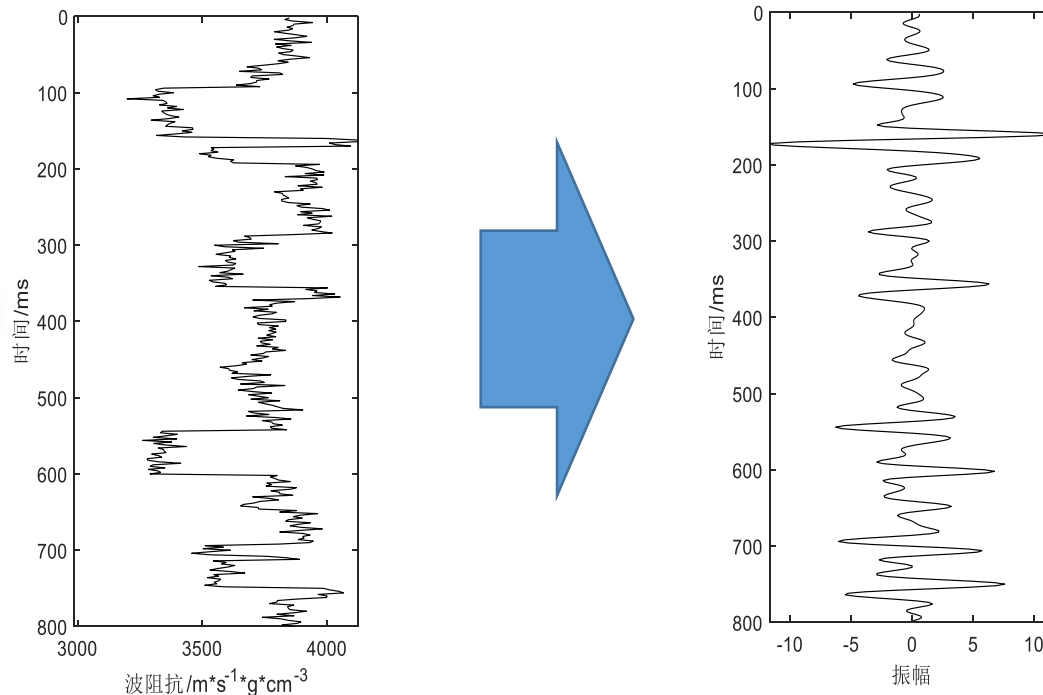
## 步骤1: 海量虚拟井生成——地震子波提取、合成地震记录



地震记录与提取的子波振幅谱

提取的时间域子波

思路: 对地震道做傅里叶变换, 保留振幅谱部分, 将相位谱置为零, 傅里叶反变换。



虚拟井波阻抗

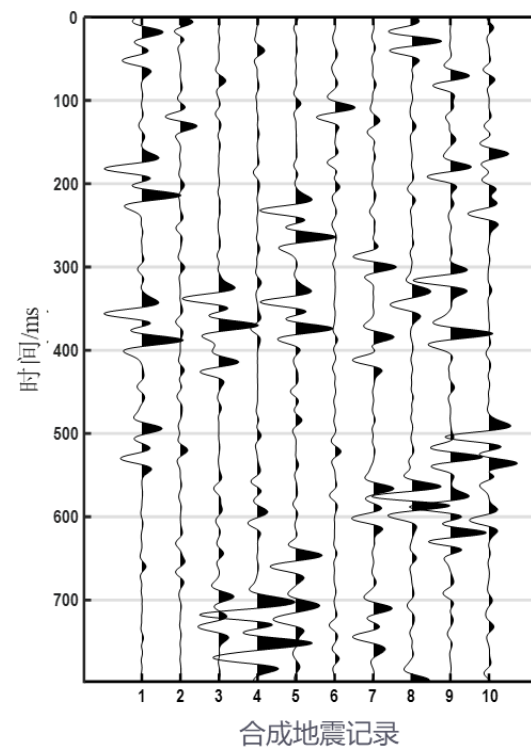
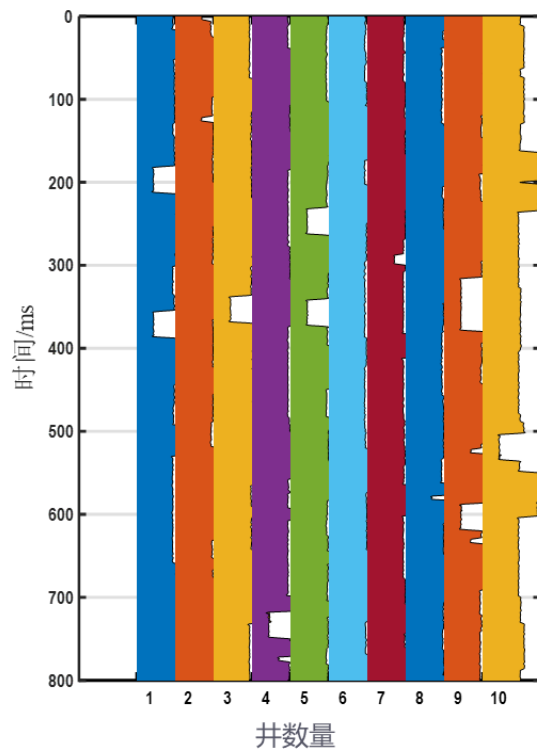
合成地震记录

将提取的子波和虚拟井进行褶积, 得到合成地震记录



# 模型试算

## 步骤1：海量虚拟井生成



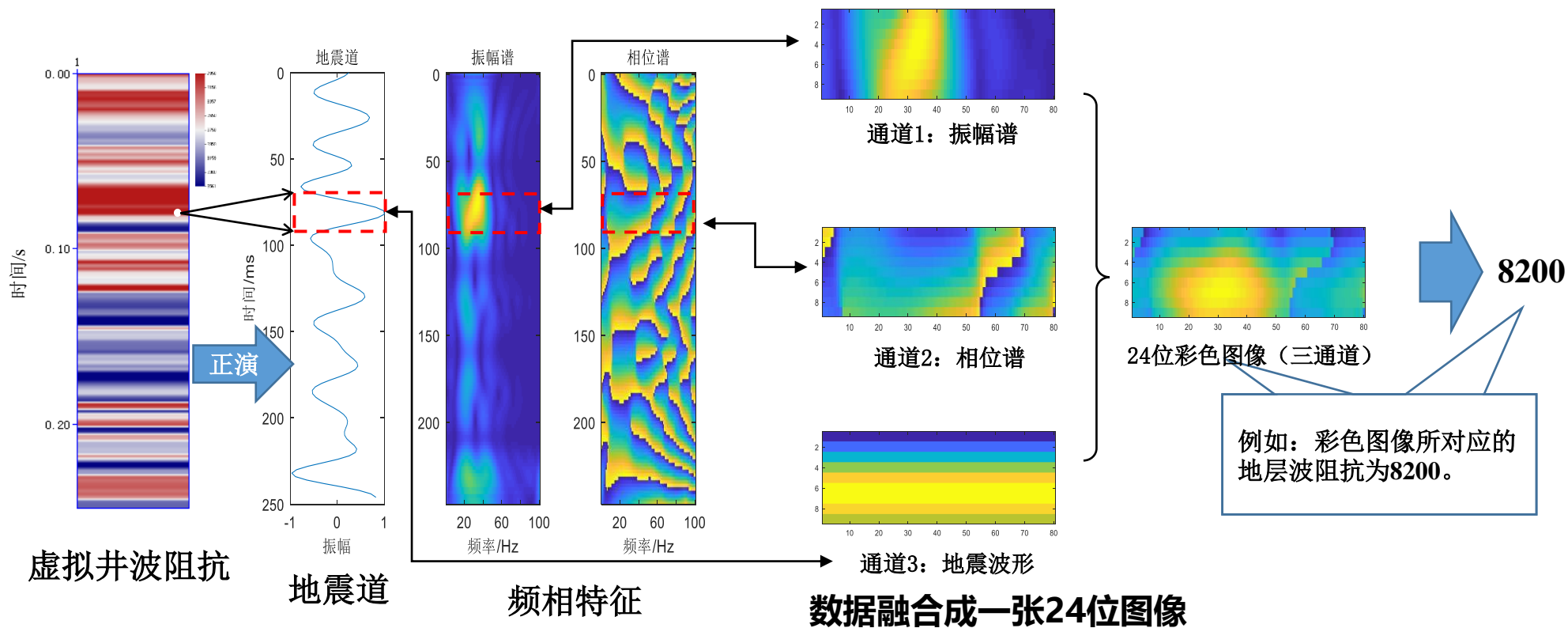
其中的10口虚拟井及其合成地震记录

生成成百上千口虚拟井，并正演得到其合成地震记录。

# 模型试算

## 步骤2：地震频相信息的融合与标签制作

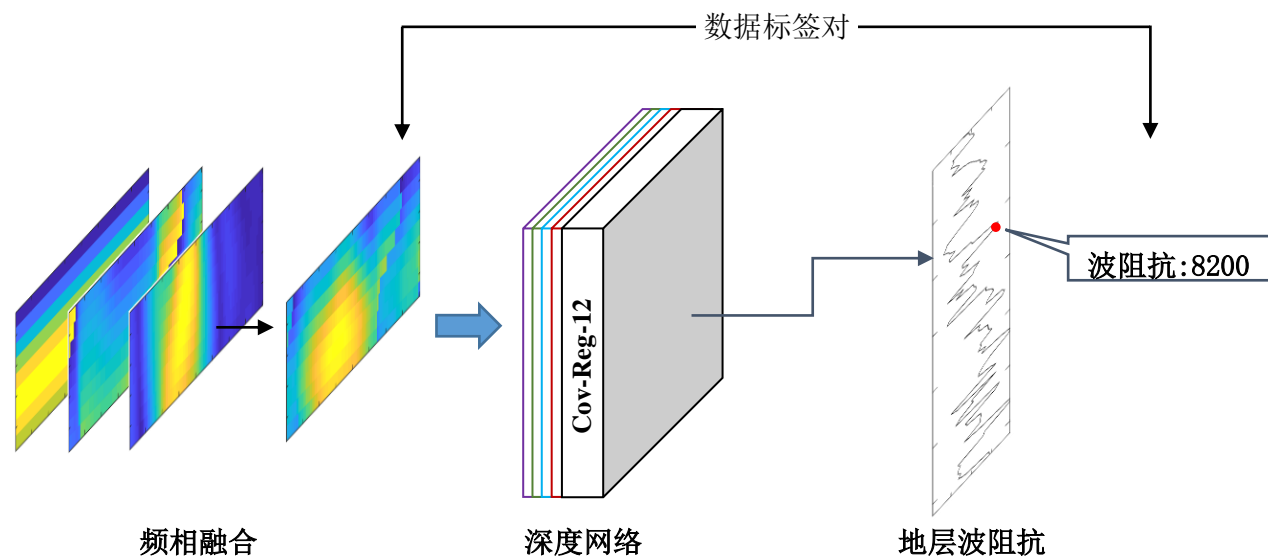
点-窗策略：某一时间深度的测井数据对应一定时窗内的地震数据作为数据和标签对。



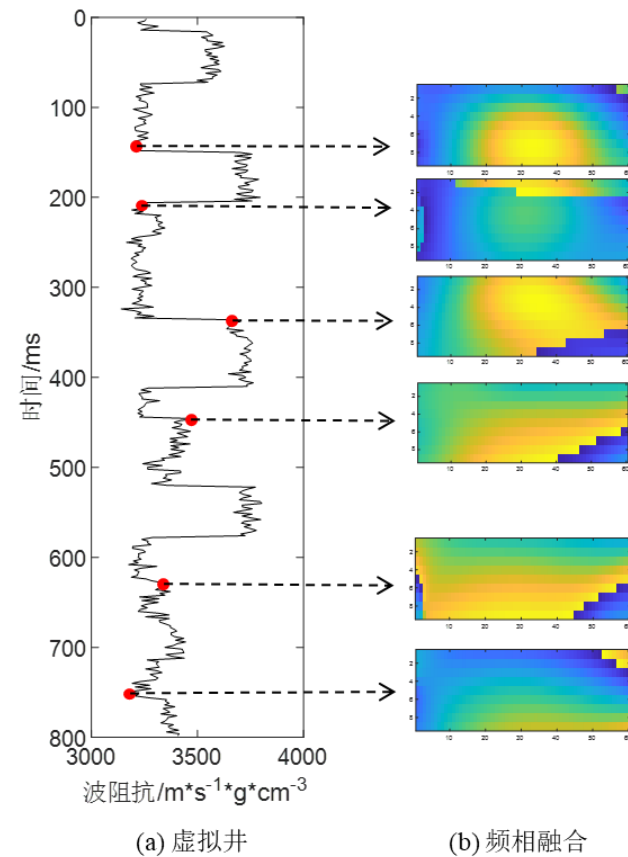
首次提出并实现了基于点-窗策略的频相融合数据标签制作

# 模型试算

## 步骤2: 地震频相信息的融合与标签制作



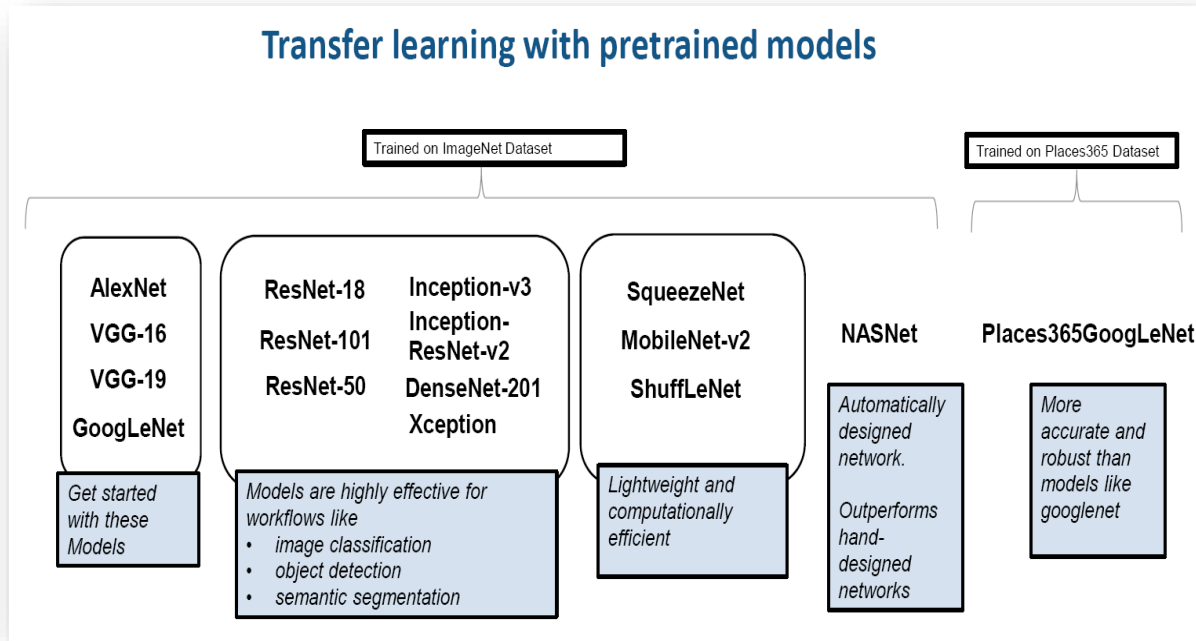
## 数据标签对



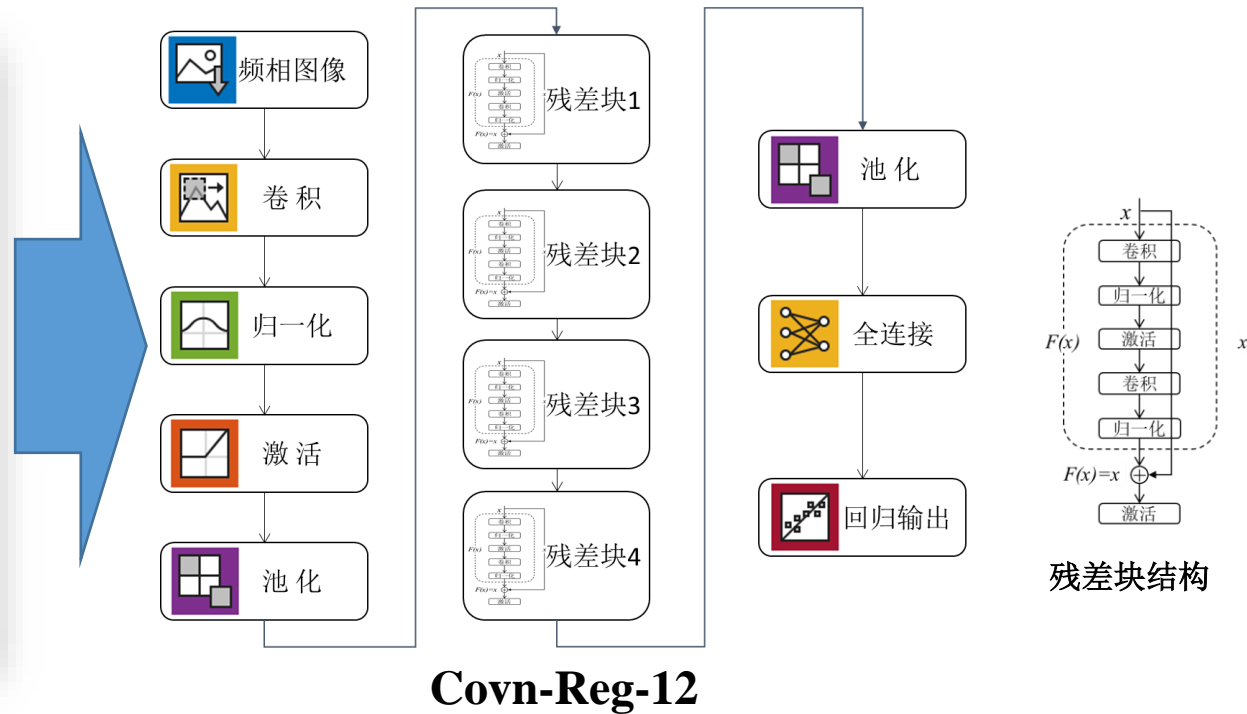
不同时刻、不同大小的波阻抗对应的频相特征是不一样的，因此，可以通过频相特征反演波阻抗信息。

# 模型试算

## 步骤3：深度网络优选与学习



## MATLAB中的预训练深度网络模型



基于MATLAB的迁移学习，设计卷积回归型残差深度网络，简记为：Covn-Reg-12

# 模型试算

## 步骤3：深度网络优选与学习

1. SGD
2. SGDM
3. AdaGrad
4. Adam

将样本总体分成多个mini-batch。例如100万的数据，分成10000份，每份包含100个数据的，每次梯度下降使用其中一个mini-batch进行训练，除此之外和梯度下降法没有任何区别。

```
options = trainingOptions('adam', ...
```

```
'MiniBatchSize',128, ...
```

```
'MaxEpochs',200, ...
```

最大迭代次数

```
'InitialLearnRate' ,1e-3, ...
```

学习率 $\alpha$

$$\theta_j = \theta_j - \alpha \frac{\Delta J(\theta)}{\Delta \theta_j}$$

```
'Shuffle','every-epoch', ...
```

```
'ValidationData',imdsValidation, ...
```

迭代50次，用验证数据集验证一下训练的误差。

```
'ValidationFrequency',50, ...
```

用gpu实现并行，提高效率10倍左右。

```
'ExecutionEnvironment','gpu',...
```

```
'WorkerLoad',[],...
```

运行时，不显示详细信息。

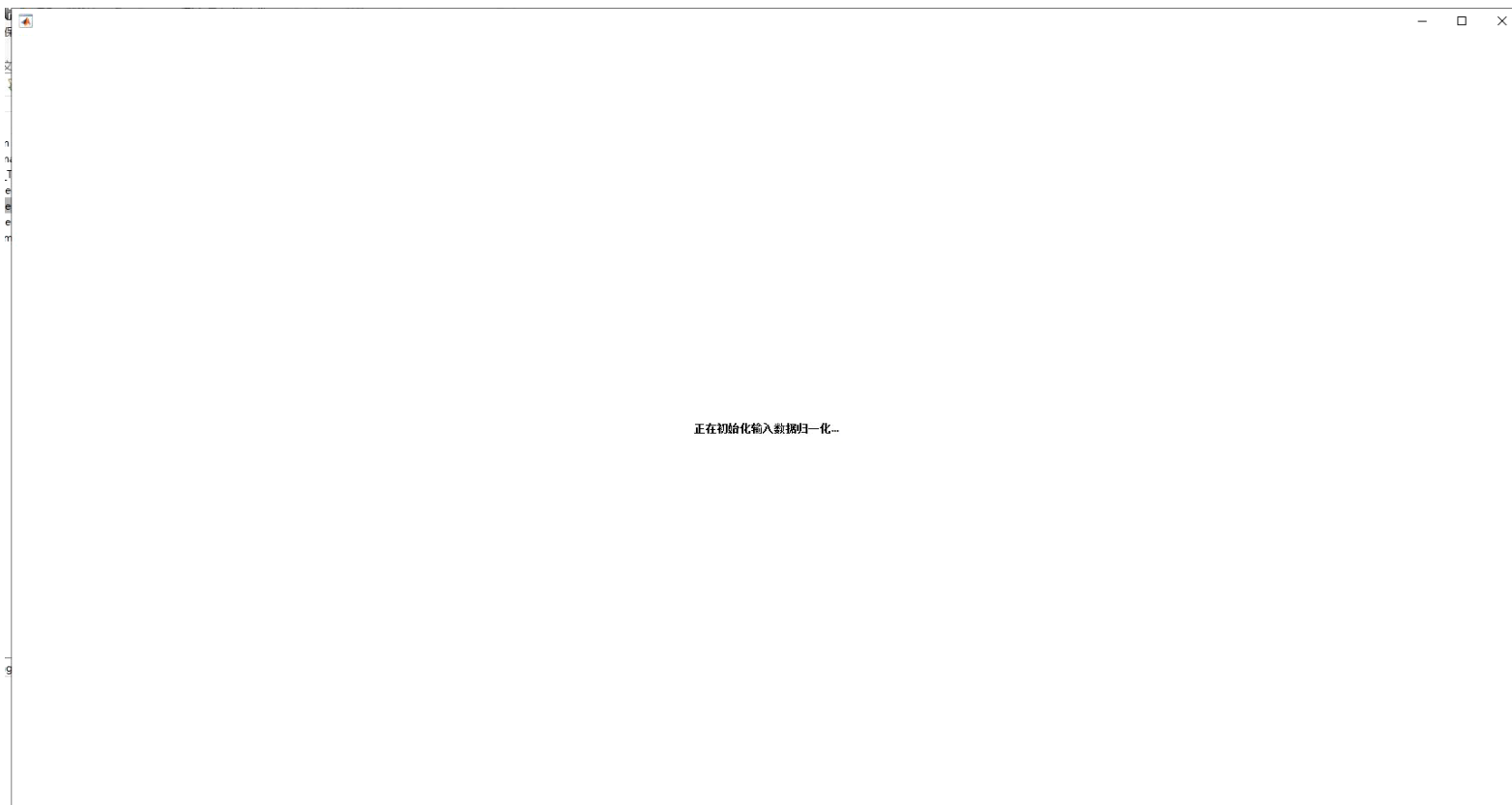
```
'Verbose',false, ...
```

运行时，绘制训练的过程。

```
'Plots','training-progress');
```

# 模型试算

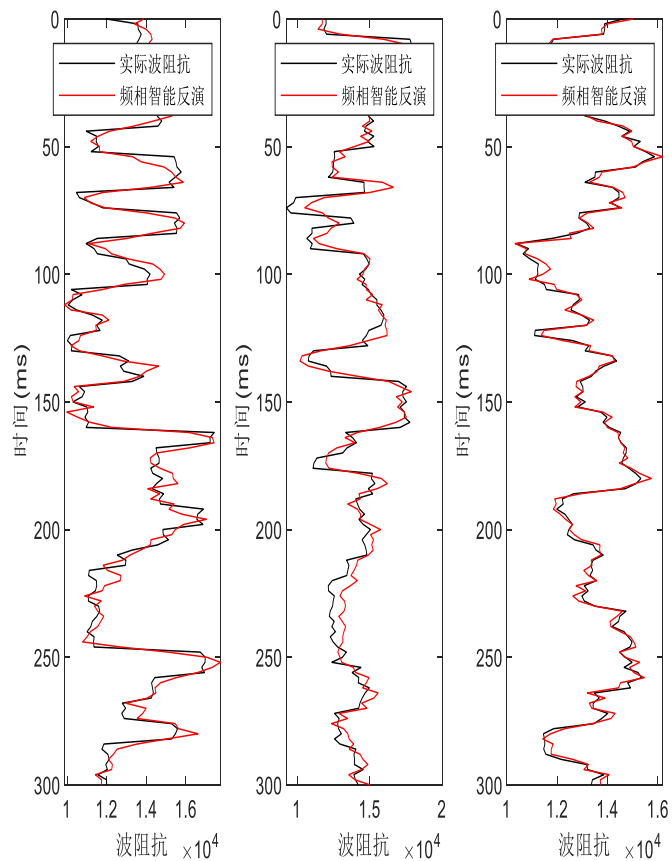
## 步骤3：深度网络优选与学习



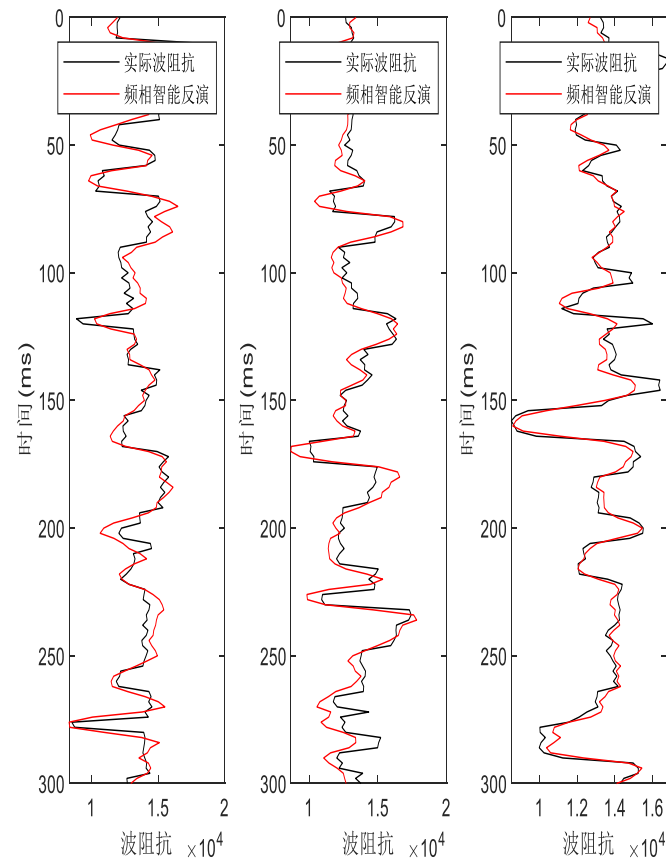
训练网络

# 模型试算

## 步骤4: 频相智能反演输出



训练数据, 准确度: 92.5%

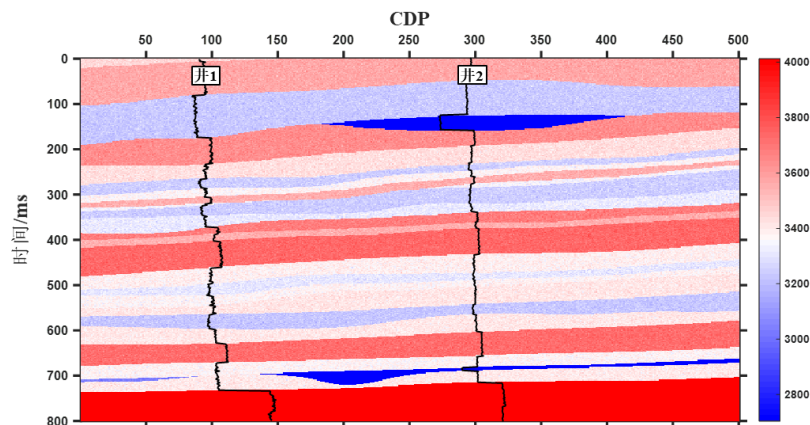


测试数据, 准确度: 85%

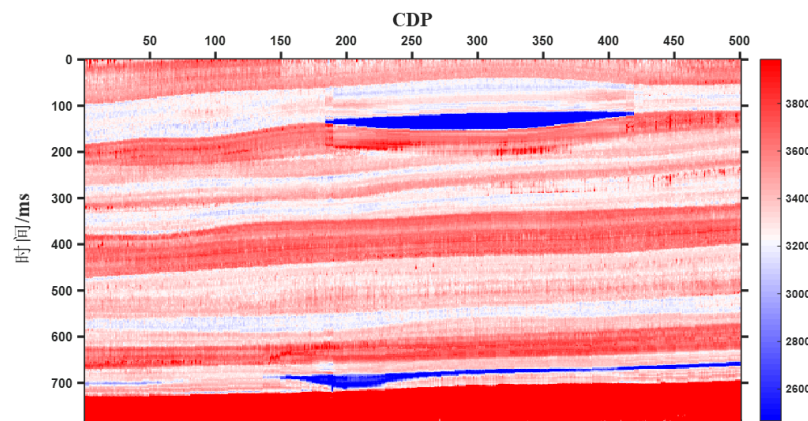
85%数据用于训练深度学习网络, 15%用于测试, 分析反演结果的准确度和泛化能力

# 模型试算

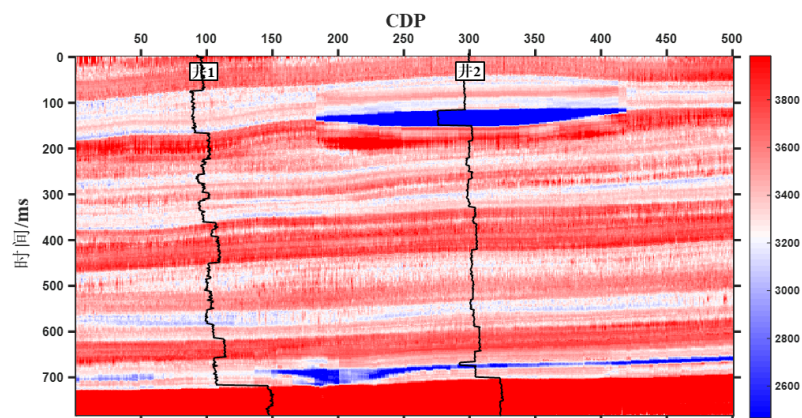
## 步骤4：频相智能反演输出



(a) 实际地质模型



(b) 虚拟井（100口）+模型井（10口）



(c) 虚拟井（100口）+模型井（井1、井2）

图(a)实际的地质模型，图(b)为100口虚拟井加上10口模型井（在剖面上均匀抽取）的频相智能反演结果，其 $R^2$ 为0.91，图(c)为100口虚拟井加上2口模型井（井1、井2）的频相智能反演结果，其 $R^2$ 为0.88。

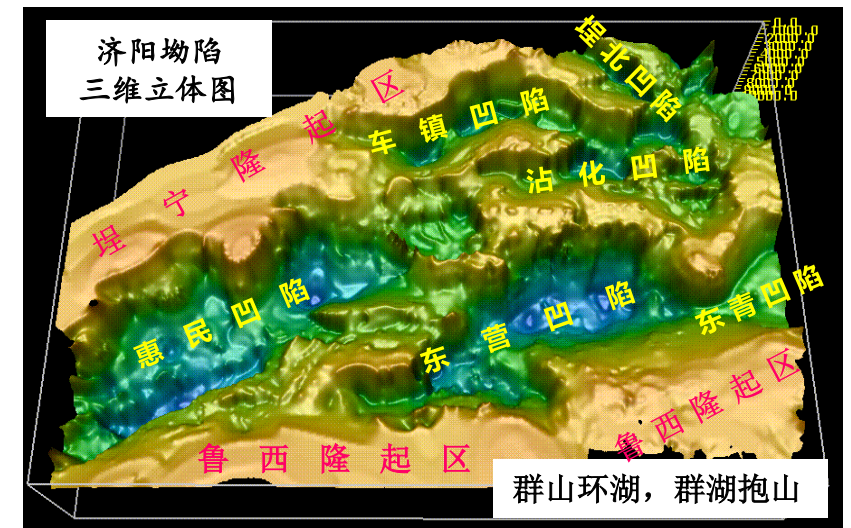
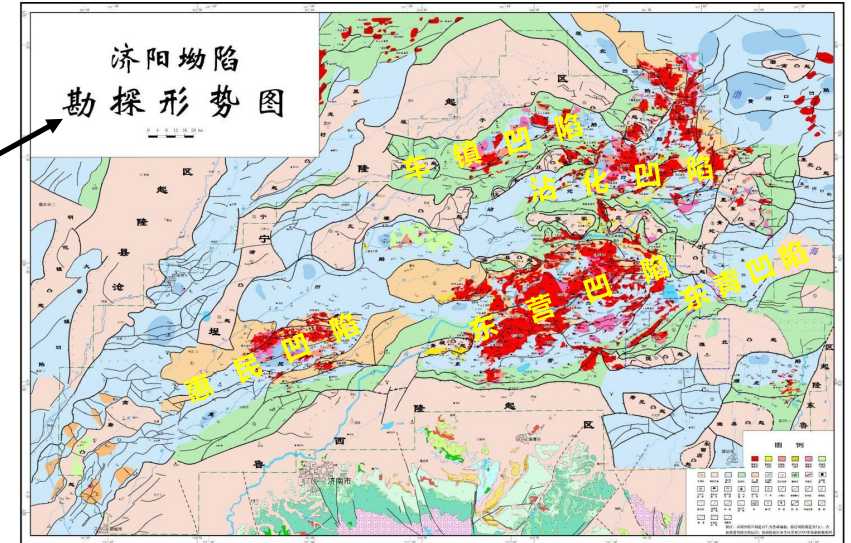
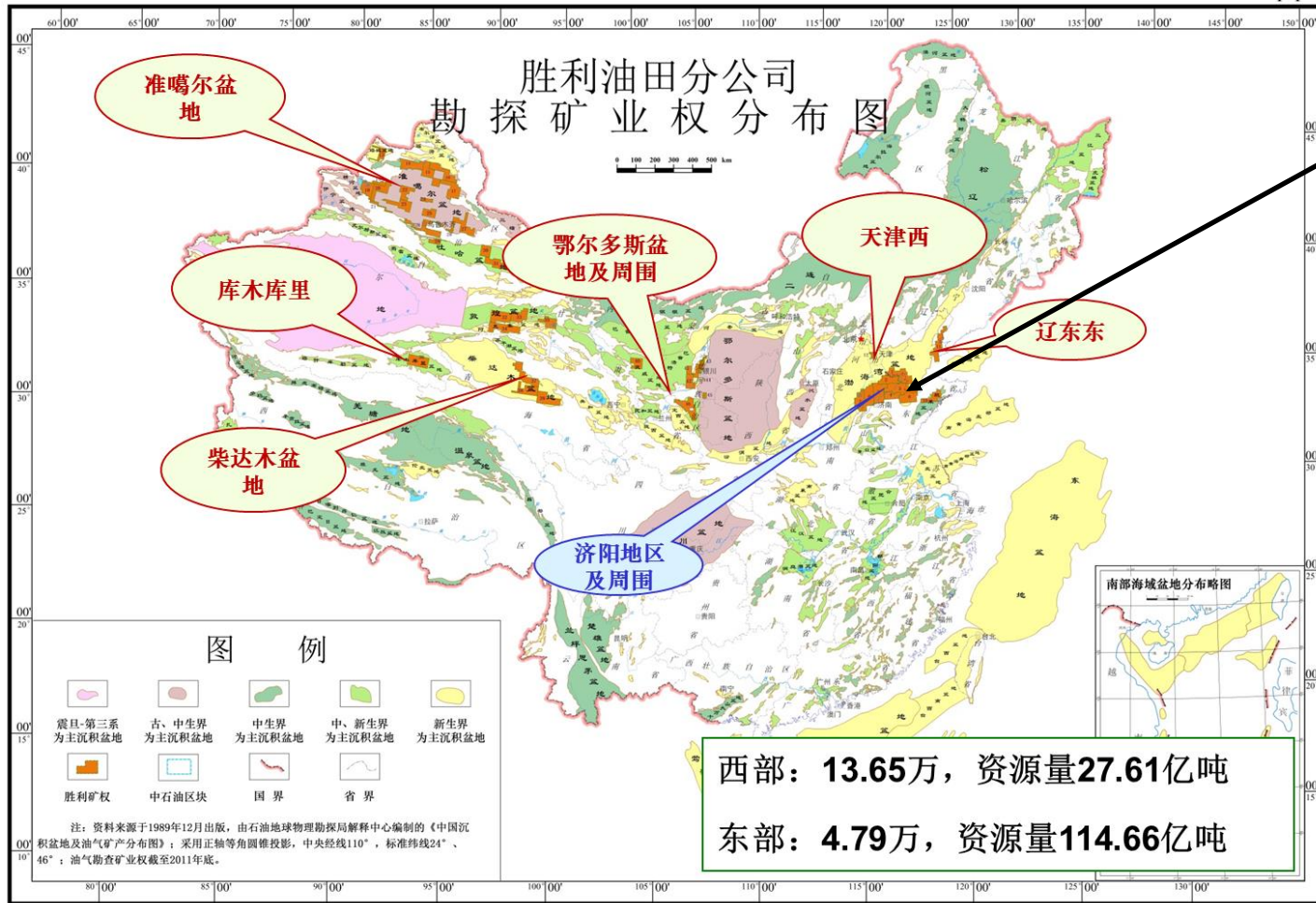
衡量拟合优度的统计量是可决系数，定义如下：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$$

$R^2$ 的最大值为1，值越大，说明回归值对观测值的拟合程度越好。

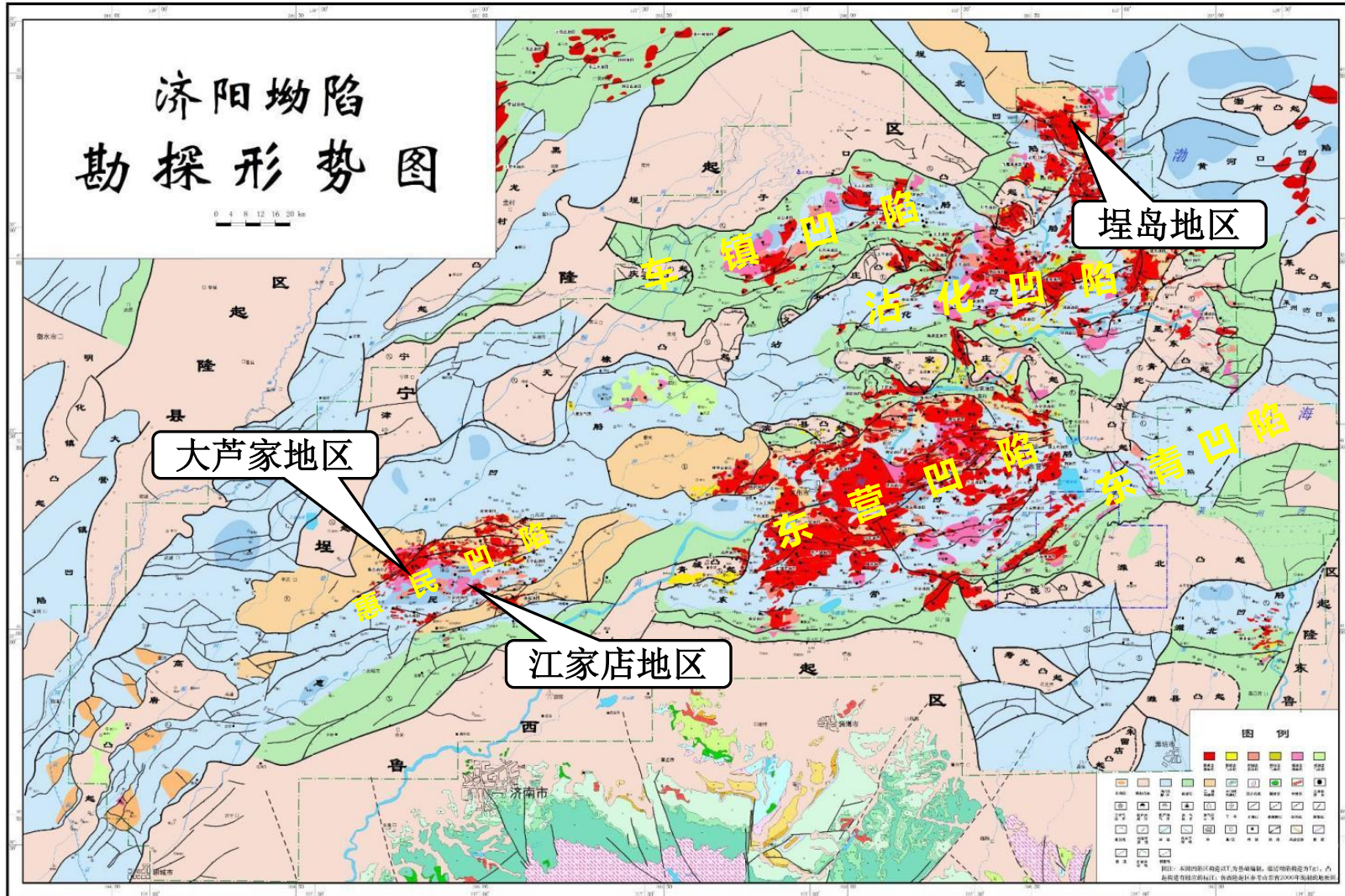


# 实际应用



胜利探区包括东部和西部，总面积18.39万平方公里，资源量142.27亿吨。

# 实际应用

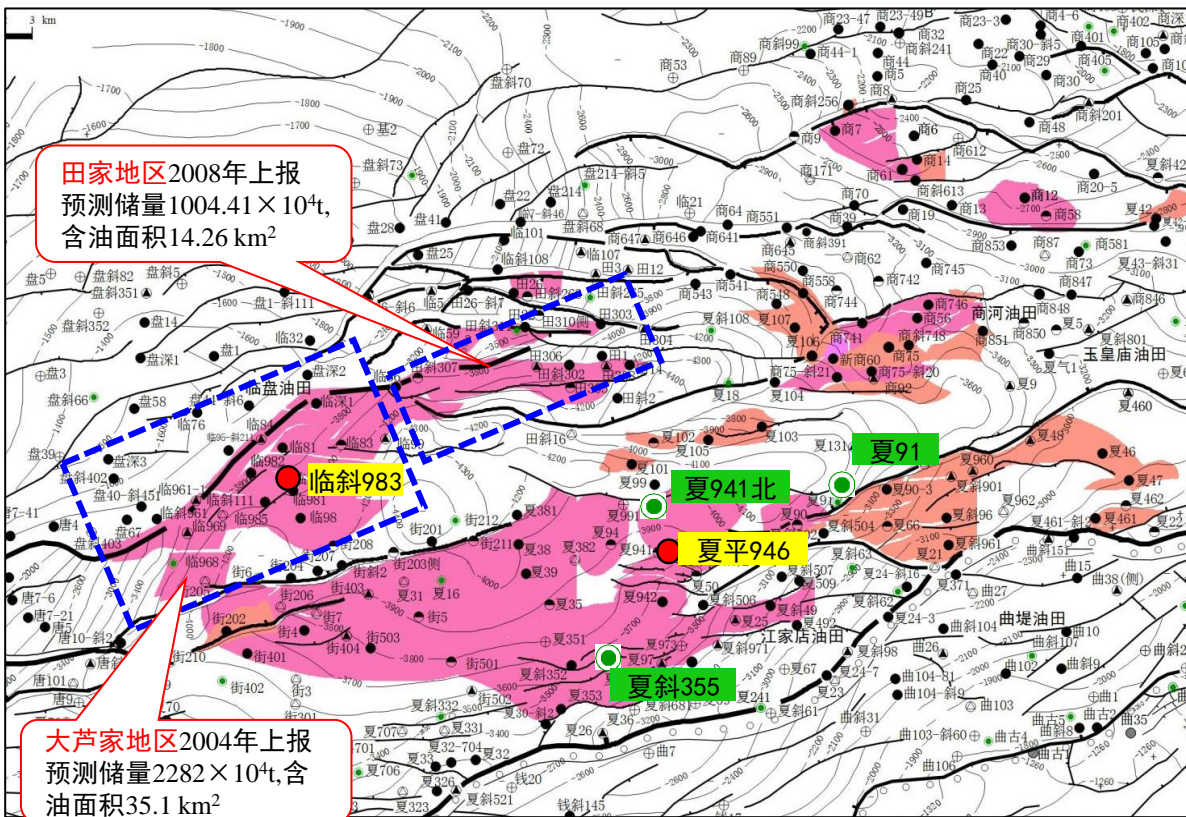


## 频相智能反演实际应用

地区	储层类型	反演目标
埕岛	曲流河	波阻抗
大芦家	前缘砂 浊积岩	波阻抗 孔隙度
江家店	前缘砂	GR

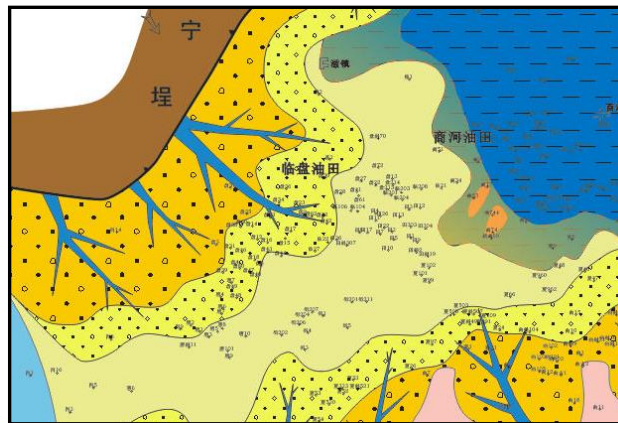
# 实际应用

## 济阳拗陷大芦家地区实际应用

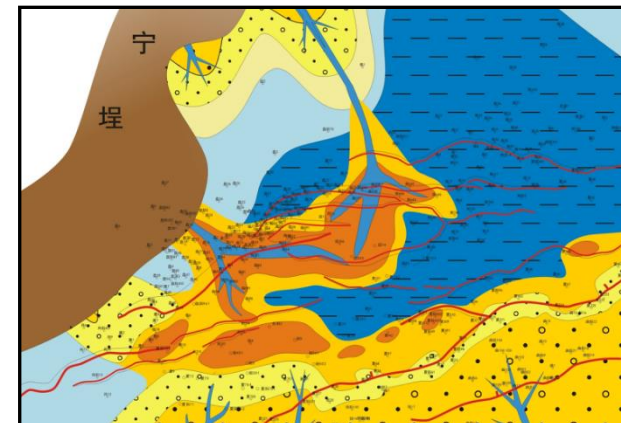


大芦家-田家地区沙三下已累计上报预测储量三千多万吨，是目前该地区增储上产的热点。

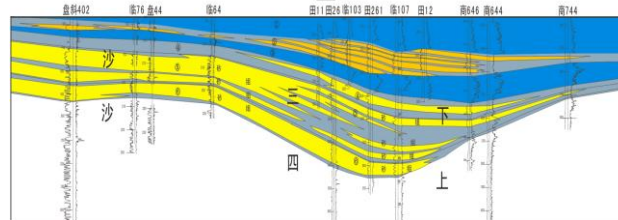
临南洼陷沙三下亚段早期沉积相图



临南洼陷沙三下亚段晚期沉积相图



盘斜402-临64-田12-临107-商744井东西向沙三下地层对比图

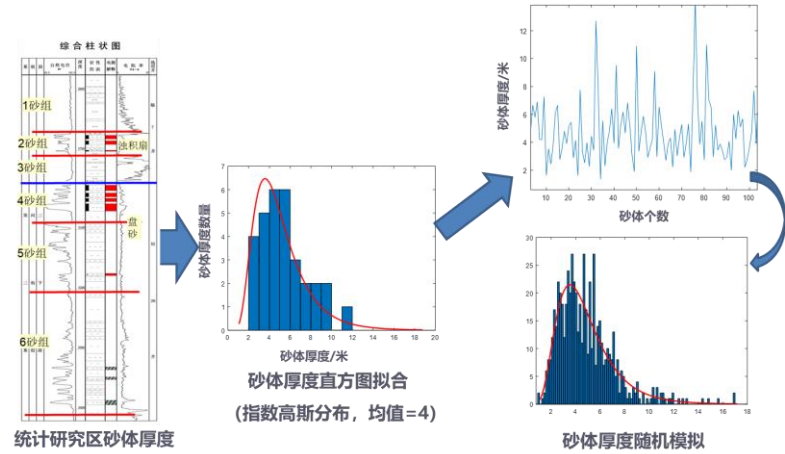


沙三下早期（456砂组）：  
发育三角洲前缘  
沙三下晚期（2砂组）：  
发育深水浊积砂岩

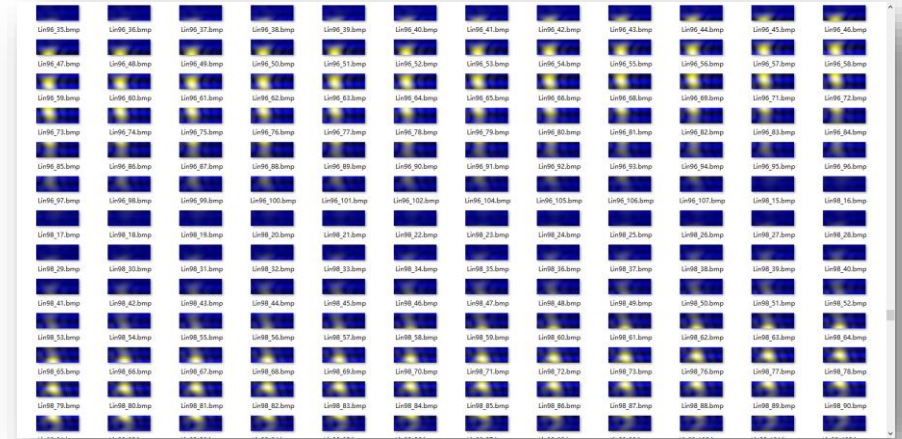
该区泥岩、油页岩的速度在3200~4000m/s以内，储层的速度在4200m/s以上，速度差异较大。因此，开展了波阻抗反演。

# 实际应用

## 步骤1：海量虚拟井生成

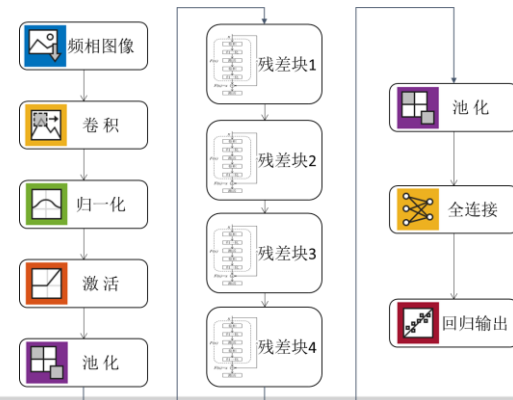
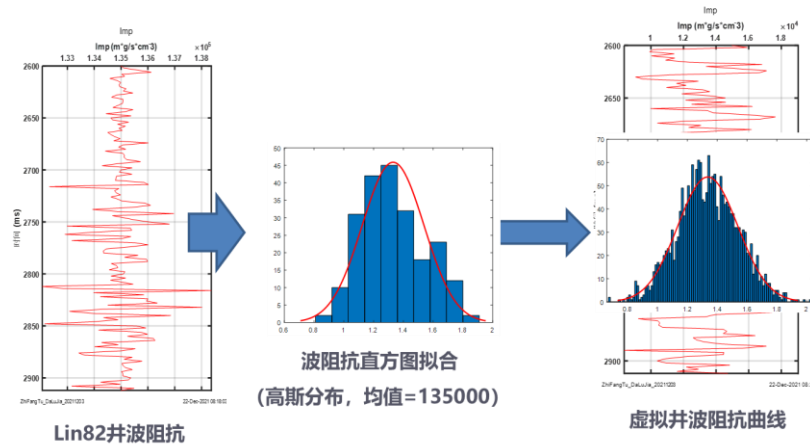


## 步骤2：地震频相信息的融合与标签制作



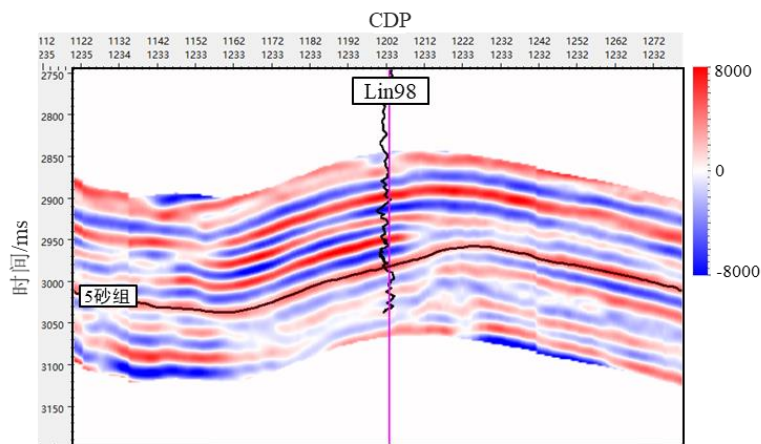
生成了300口虚拟井，总共约80000个标签!

## 步骤3：深度网络优选与学习

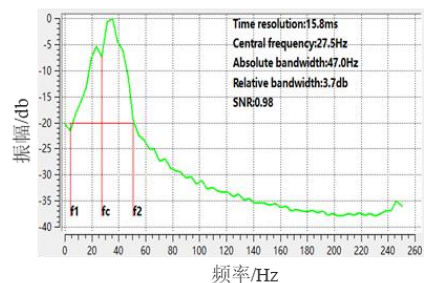


# 实际应用

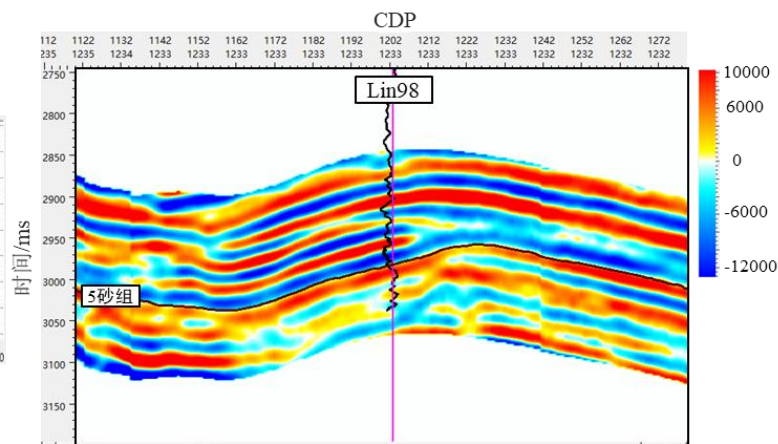
## 步骤4：频相智能反演输出



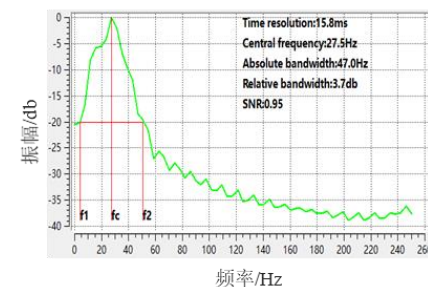
(a) 原始地震



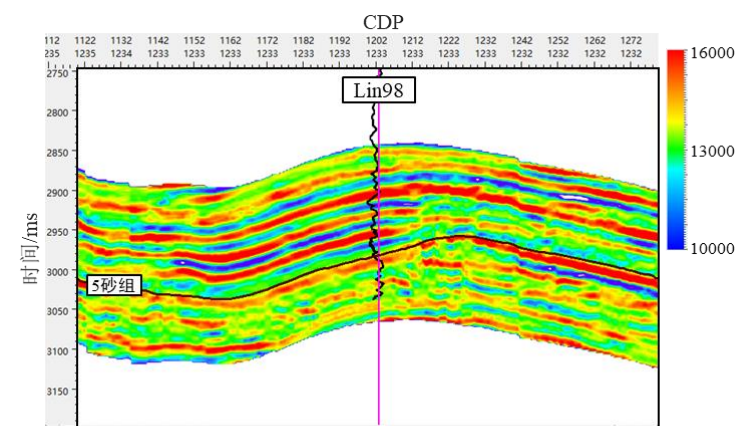
(b) 原始地震频谱



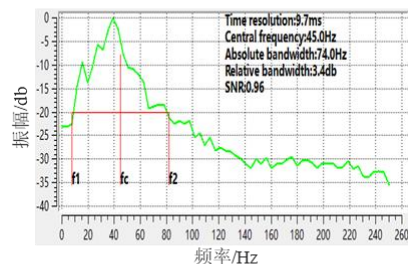
(c) 道积分反演



(d) 道积分反演结果频谱

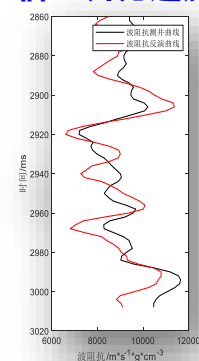


(e) 频相智能反演



(f) 频相智能反演频谱

### 临98井旁道反演



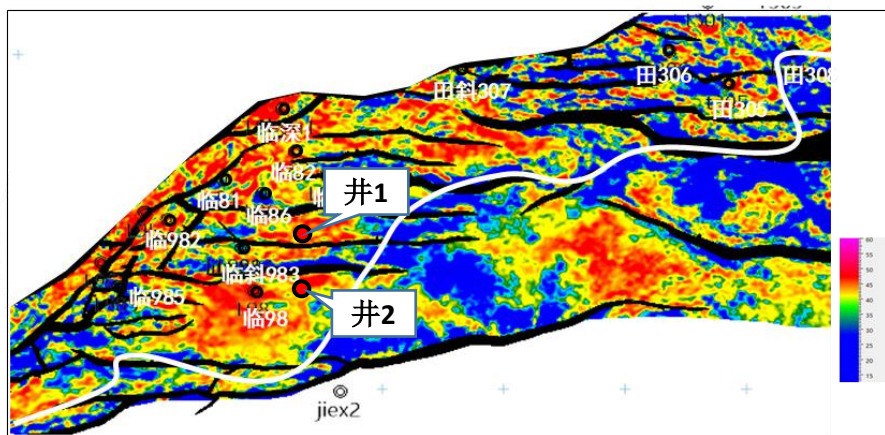
频相智能波阻抗反演结果和波阻抗曲线的相关系数为0.82。

将训练好后的网络应用于大芦家地区的地震数据，即可实现**频相智能反演**。

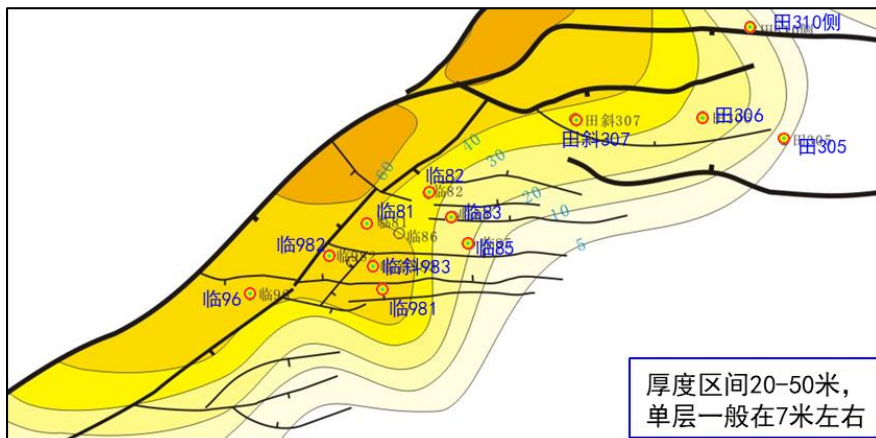
可以看出，频相智能反演结果与井的吻合度较高，且分辨率明显高于道积分。

# 实际应用

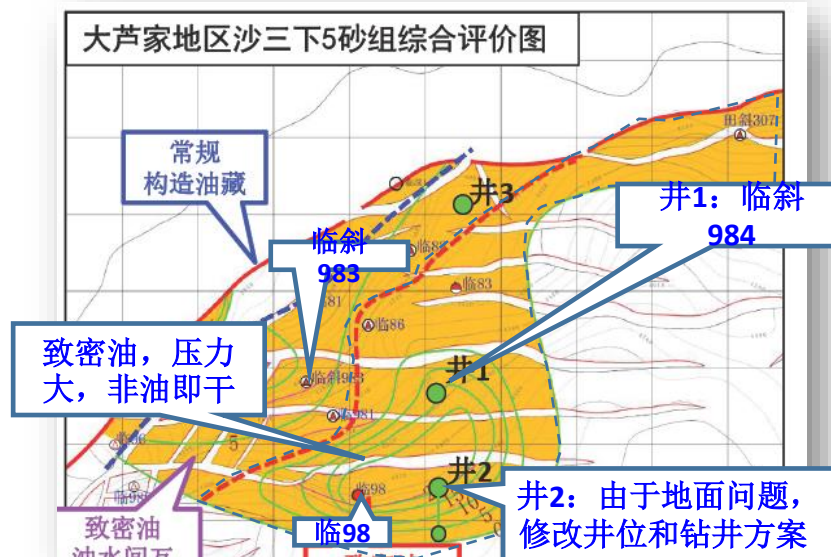
## 大芦家-田家地区沙三下5砂组波阻抗均方根属性图



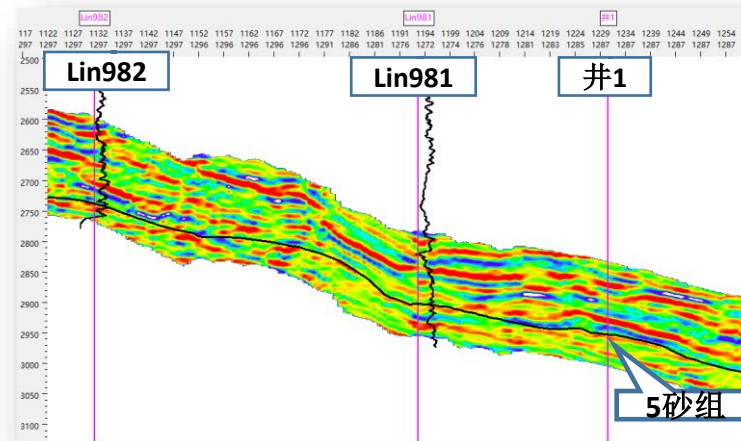
## 大芦家-田家地区沙三下5砂组砂岩厚度图



## 大芦家地区沙三下5砂组综合评价图

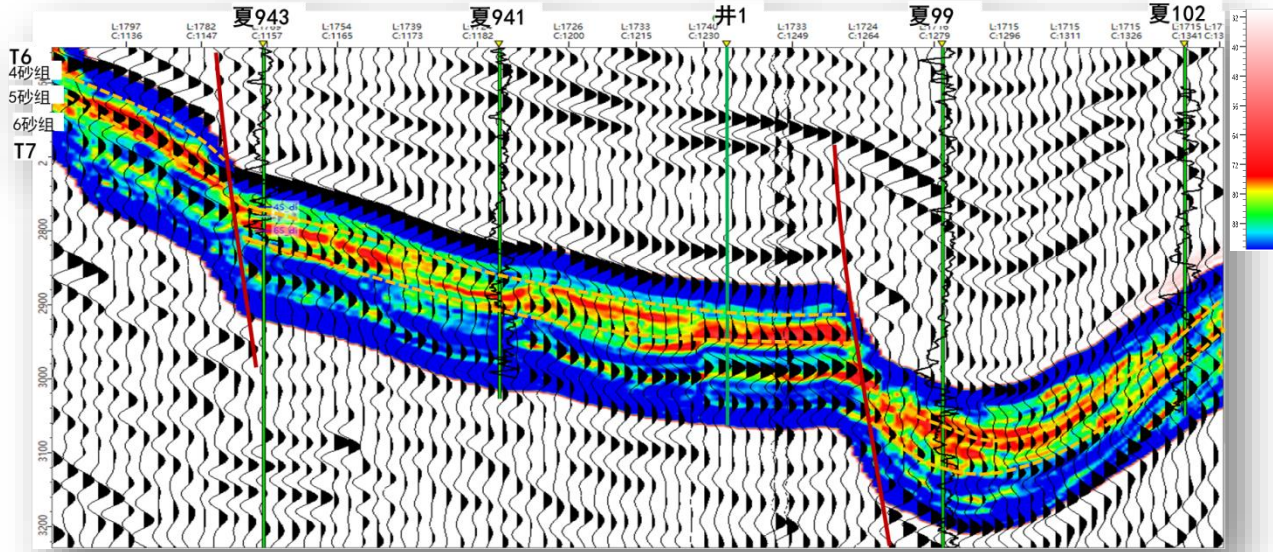


## 频相智能波阻抗反演剖面

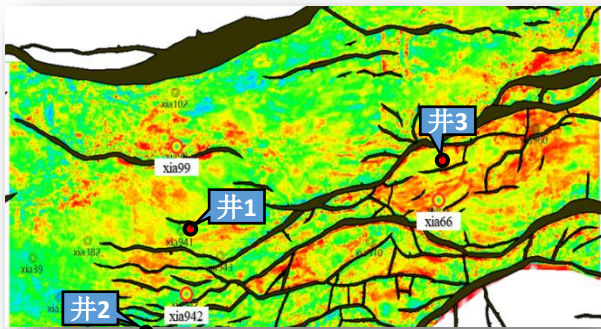


# 实际应用2

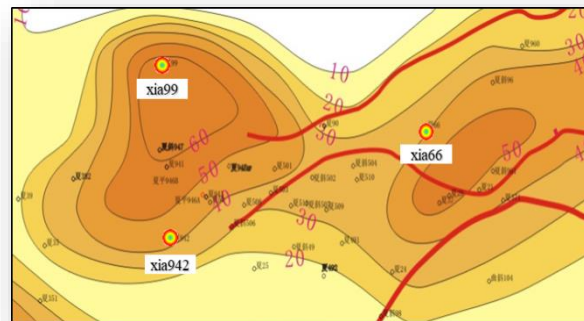
## 过夏943-井1-夏102近南北向反演剖面 (频相智能GR反演)



### 临南洼陷沙三下5砂组GR均方根属性图

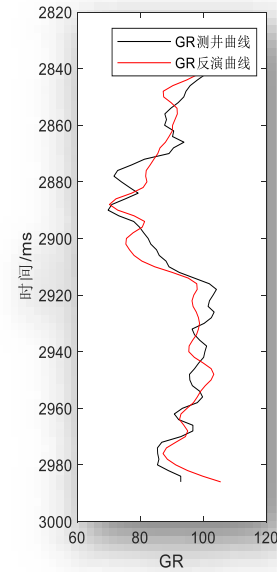


### 临南洼陷沙三下5砂组砂厚图



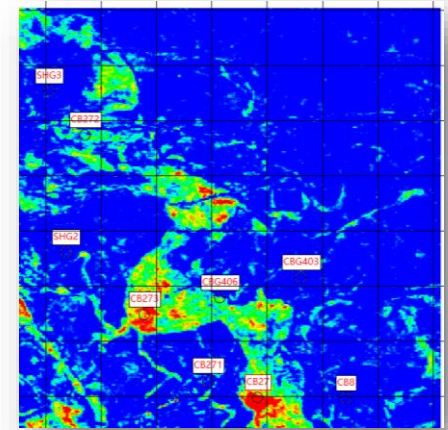
## 江家店瓦屋地区频相智能GR反演

## 夏941井旁道反演

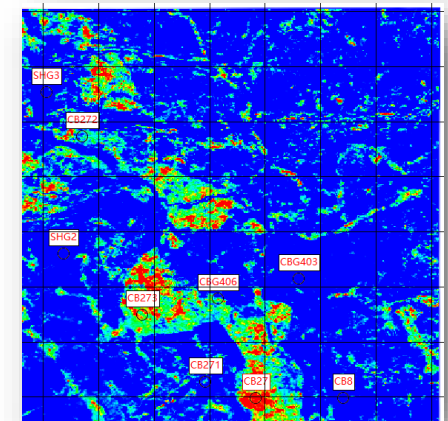


频相智能GR反演结果和GR曲线的相关系数为0.85。

## 道积分



## 频相智能反演



## 埕岛地区频相智能波阻抗反演

# 总结

- 1.分析了地震数据频相特征;
- 2.开发了频相智能反演方法;
- 3.取得了显著实际应用效果。



# MATLAB EXPO

Thank you



© 2022 The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See [mathworks.com/trademarks](https://www.mathworks.com/trademarks) for a list of additional trademarks. Other product or brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.