



波现象与智能反演成像研究组



WPI对地震波成像的观点 暨CWI+宽带波阻抗建模

王华忠

波现象与智能反演成像研究组 (WPI)

同济大学海洋与地球科学学院, 上海

2022年02月28日

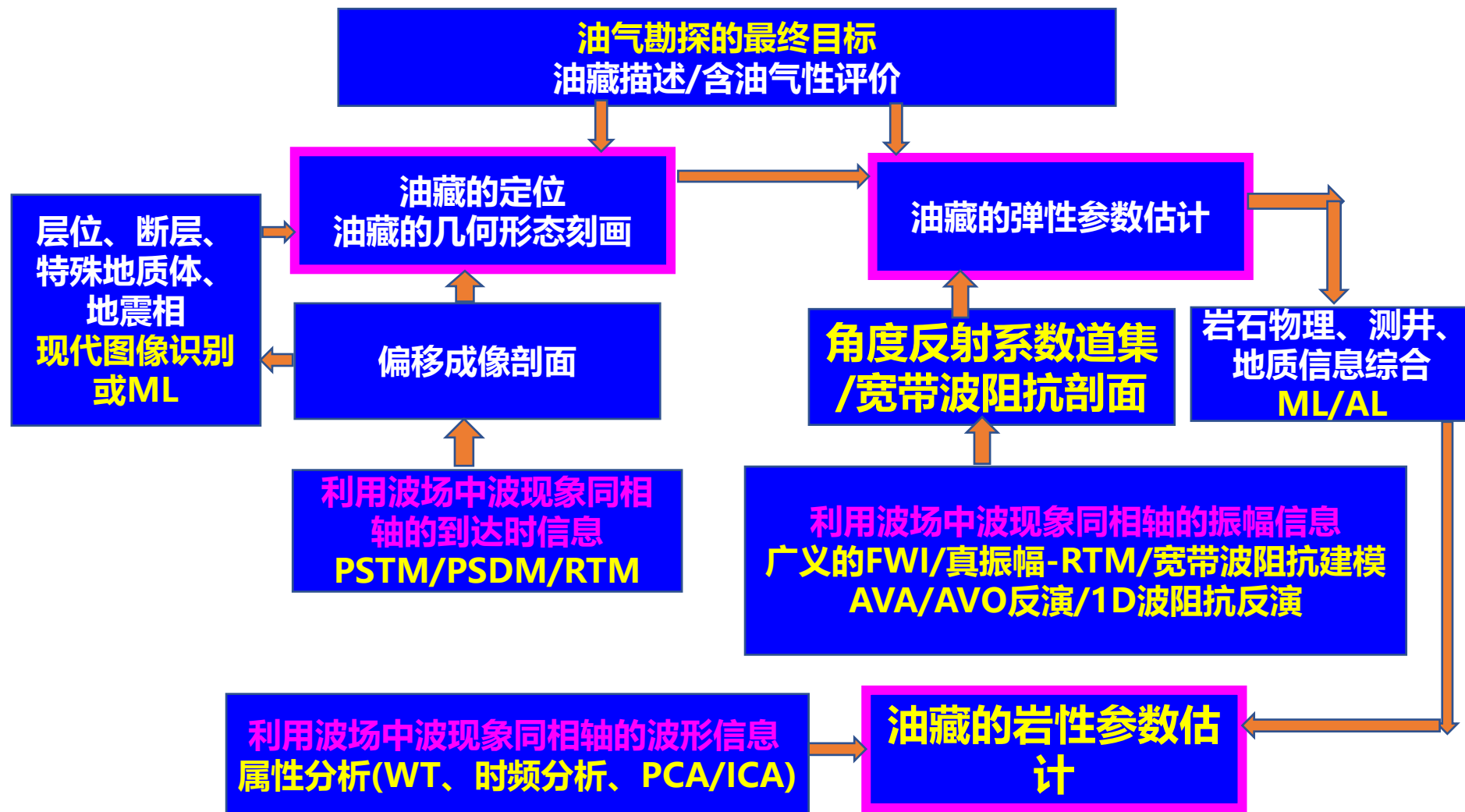
目录

- ◆一、概述
- ◆二、WPI对地震波成像观点
- ◆三、特征波反演成像（CWI）
- ◆四、多信息融合的宽带波阻抗成像
- ◆五、总结与讨论



一、概述

◆油气地震勘探中的核心技术---求解反问题:





一、概述

◆ 勘探地震中地震波高精度成像的技术要点：

◆ 高精度成像的保障---来自地下同一点的（深层）反射波的同相位叠加：

- ◆ 各向异性速度模型+Q值模型
- ◆ 各向异性+Q介质下的PSDM

◆ 高精度成像技术

- ◆ 高精度建模技术（各向异性速度+Q值）
- ◆ 高保真+高分辨的地震波成像方法技术
- ◆ 宽带波阻抗成像技术

◆ 高精度成像的基础---“两宽一高”地震数据体

目录

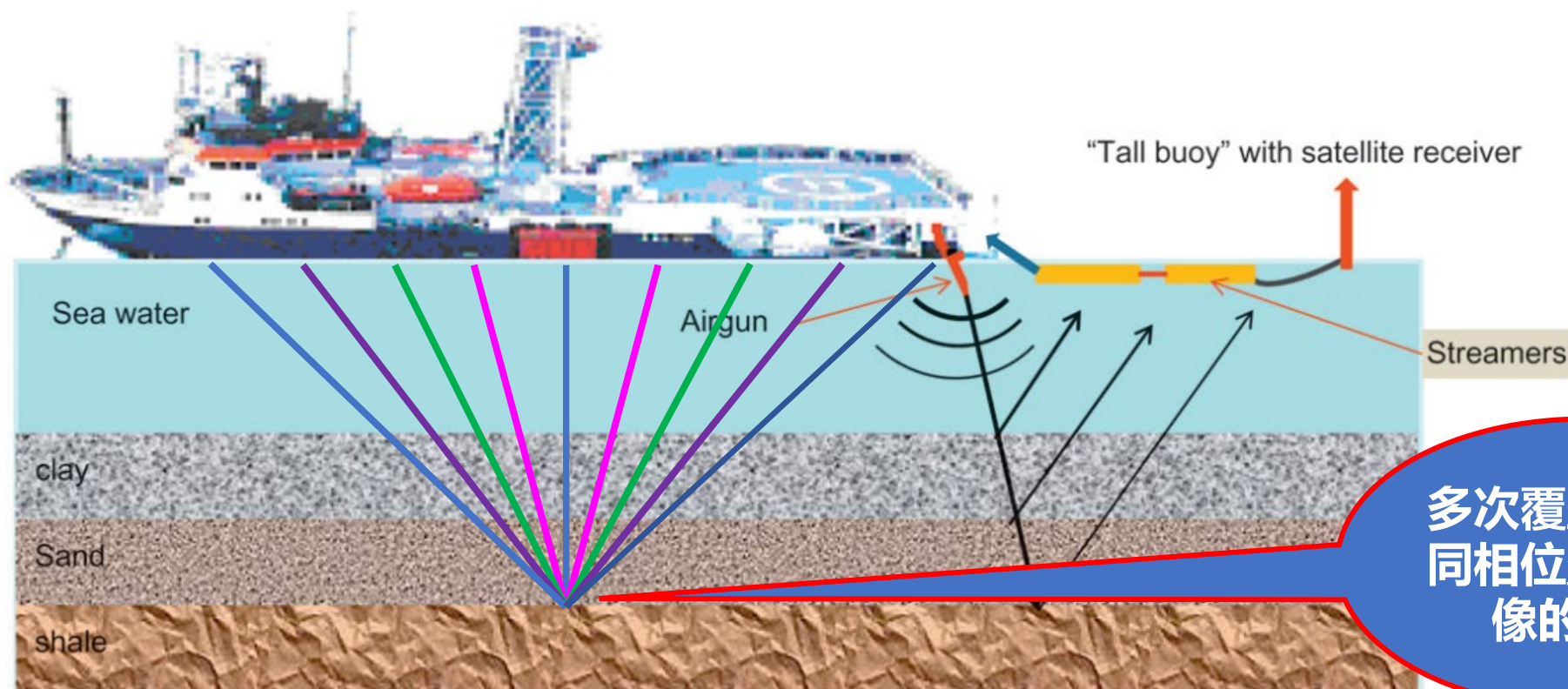
- ◆一、概述
- ◆二、WPI对地震波成像观点
- ◆三、特征波反演成像（CWI）
- ◆四、多信息融合的宽带波阻抗成像
- ◆五、总结与讨论



二、WPI对地震波成像观点

- ◆ 油气地震勘探的核心工作是油气藏的**定位、识别与描述**。
- ◆ 估计“全”或宽波数带的参数场（譬如**宽带（6-7个倍频程）反射系数、宽带绝对波阻抗**），进行（半）**定量的、高精度的油藏描述**是当前油气地震勘探的重要技术追求。
- ◆ “两宽一高”的叠前地震数据观测是重要基础。
- ◆ “两宽一高”的叠前地震数据成像处理是关键。
- ◆ 基于宽带反射系数和宽带波阻抗成像结果的地震地质解释和油藏描述是最终落脚点。

二、WPI对地震波成像观点

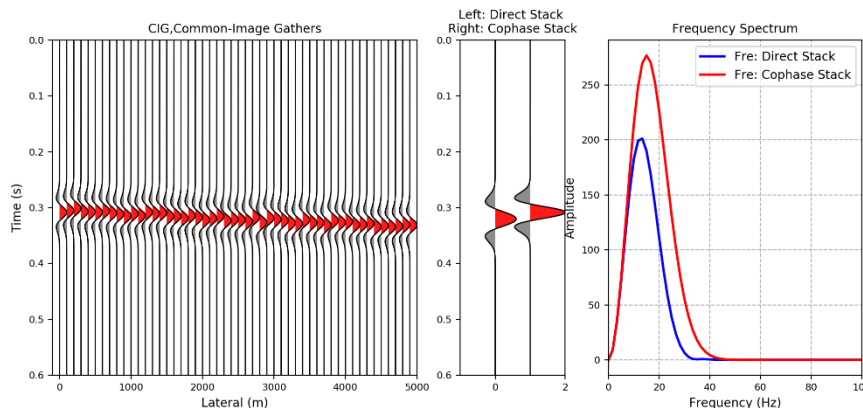


◆勘探地震学的发展始终是，在地震波反演成像理论指导下，由地震数据采集技术不断牵引与推动的。

二、WPI对地震波成像观点

◆高精度成像的本质要求：

◆保证来自地下同一反射点的、不同炮检对观测的反（散）射波（子波）实现同相位叠加。



◆同相叠加的物理保证：

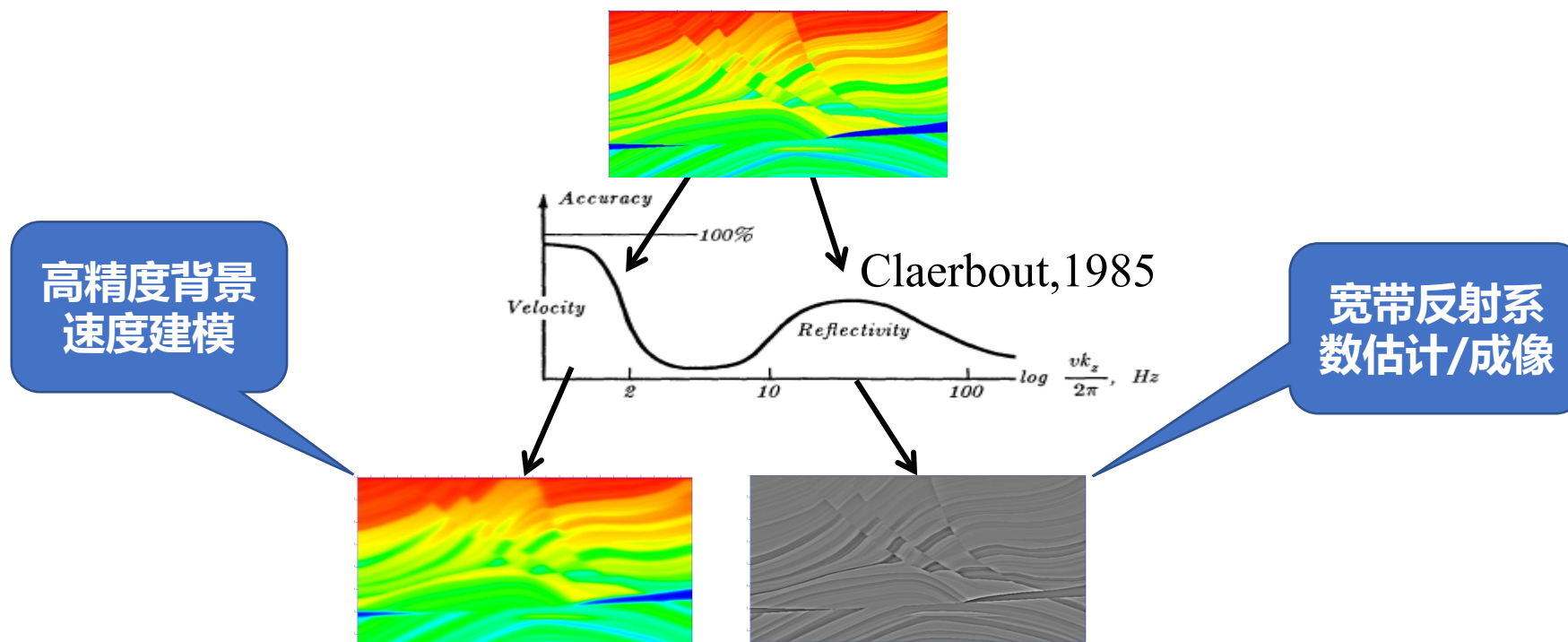
◆实际勘探介质系统可以近似地视为一个线性系统，激发的震源子波和接收的反射子波可以认为是相干信号： $W_R(t) = W_S(t) \cdot e^{i\phi}$ 。其中， $\phi = \omega t \left(t = \int_A^B \frac{dl}{v(x, y, z)} \right) + \phi_0$

◆影响同相叠加的因素：

- ◆震源子波初相位 ($\phi_0(\omega)$) --- 地表一致性校正+Q补偿;
- ◆震源子波传播的旅行时 ($t = \int_A^B \frac{dl}{v(x, y, z)}$) --- 取决于背景速度。

二、WPI对地震波成像观点

- ◆精确的背景速度估计依赖宽方位、长偏移距观测。
- ◆FWI还依赖于低频成分的存在。
- ◆精确的地震波偏移成像依赖于均匀的、宽方位的照明。
- ◆压制干扰噪音，也包括高精度成像，依赖于高密度采样。





二、WPI对地震波成像观点

◆地震波成像对叠前数据的基本要求：

- ◆1、目标地质体有宽角度的、均匀的照明---宽方位
- ◆2、目标地质体有能量足够的照明---高密度炮检点
- ◆3、反射子波的一致性---线性成像系统的本质要求
 - ◆炮与炮和道与道之间的反（散）射子波在振幅、相位和频带上的一致性
- ◆4、反射子波的频带范围---宽带
 - ◆2-80Hz? (√) ; 5-80Hz? ; 8-80Hz?
- ◆5、波场和相干噪音的无假频采样---高密度检波端采样
 - ◆共检波点道集也要无假频采样!

目录

- ◆一、概述
- ◆二、WPI对地震波成像观点
- ◆三、特征波反演成像 (CWI)
- ◆四、多信息融合的宽带波阻抗成像
- ◆五、总结与讨论

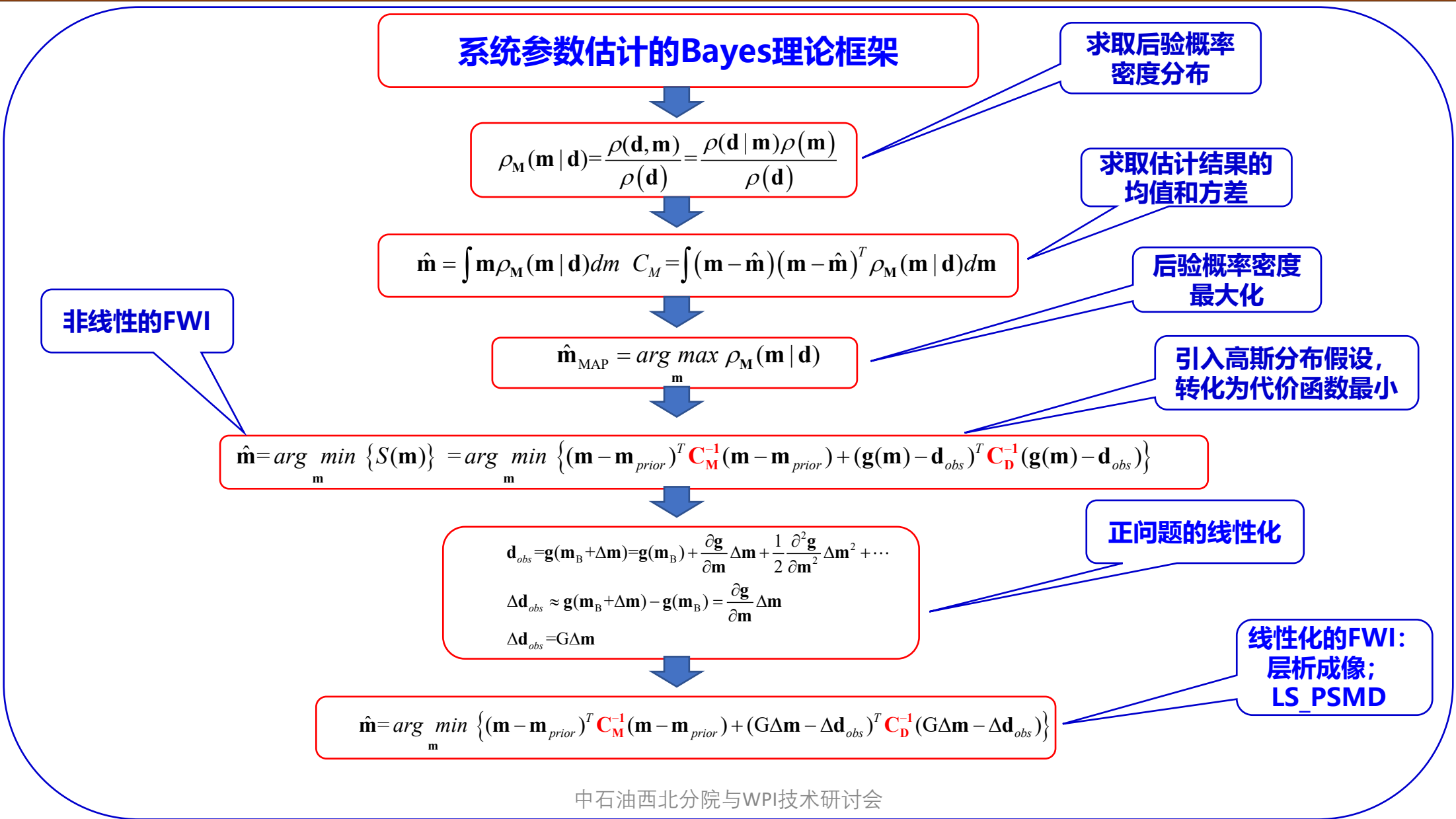


三、特征波反演成像 (CWI)

- ◆地震波成像是一个反问题。
- ◆所有的反问题本质上都是在信息不充分情况下的决策问题！
- ◆求解（强）非线性反问题的基本逻辑：
 - ◆把强非线性的参数估计反问题转化为一组较凸的反问题进行求解。
 - ◆根本目的是应对由于初始速度模型选择不合适导致反问题的强非线性性。
 - ◆次要目的是应对正问题的不合理选择和噪音不满足高斯分布。



三、特征波反演成像 (CWI)





三、特征波反演成像 (CWI)

◆总结性观点:

- ◆ 当前，没有强非线性反问题求解的严谨的数学理论。
- ◆ Bayes估计仅仅在条件后验密度函数是单峰的，才能给出反演解的明确意义。
- ◆ **非线性反问题是人造的！** 选择一个非线性的正问题，构建一个强非线性反问题，然后努力去求解。这不是一个正确的求解反问题的逻辑。
- ◆ 要努力构建凸的反问题，把凸的反问题求解好。
- ◆ 不对正问题进行深入地分析，不细心选择正问题，而是构建一个强非线性反问题进行求解，导致反演结果不能收敛或很难收敛到期望的解。**FWI就是这样做的典型的例子！**



三、特征波反演成像 (CWI)

◆把强非线性的参数估计反问题转化为一组较凸的反问题进行求解的物理依据：勘探地震的介质特征、波场特征、数据特征。

◆用不同的波现象构建不同的反演方法：

◆透射波（直达、折射、Diving Wave）

◆透射波场的AI/ML识别

◆与特征反射对应的特征反射波---层析成像

◆选择特征反射层（用 $v_B(x)$ 和 $R(x, \theta)$ 表达背景速度模型）

◆筛选对应的特征波场

◆特征波场的T-FWI和或A-FWI

◆基于地震相的梯度预处理



三、特征波反演成像 (CWI)

◆把强非线性的参数估计反问题转化为一组较凸的反问题进行求解的物理依据：勘探地震的介质特征、波场特征、数据特征。

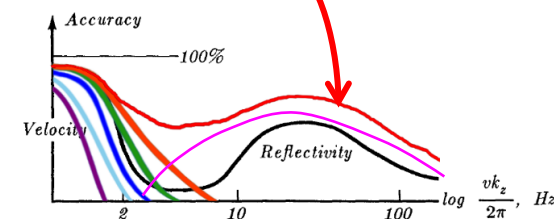
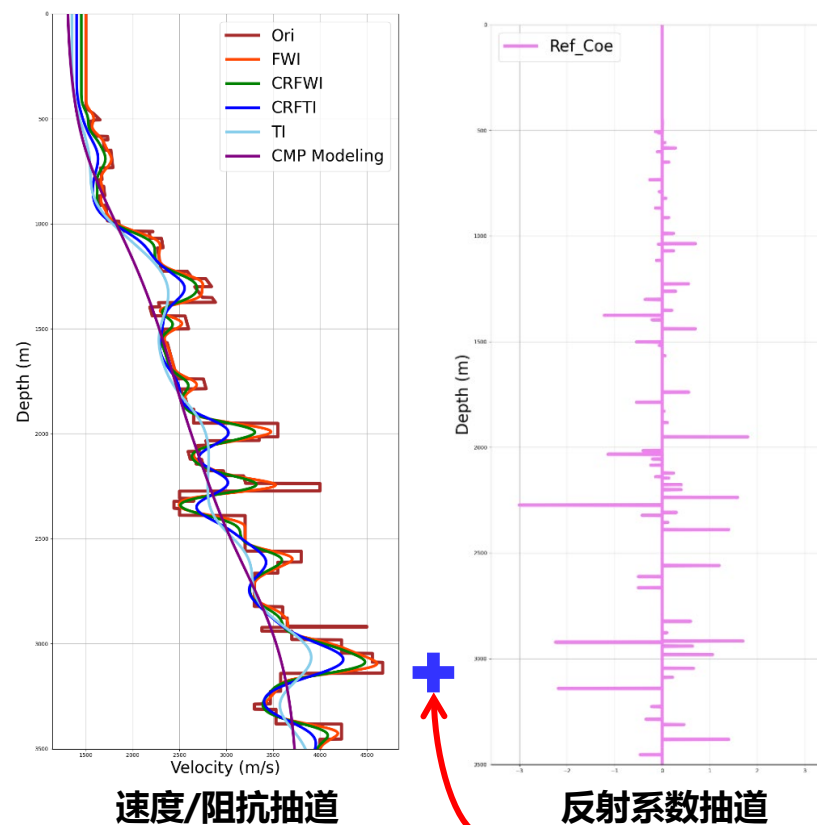
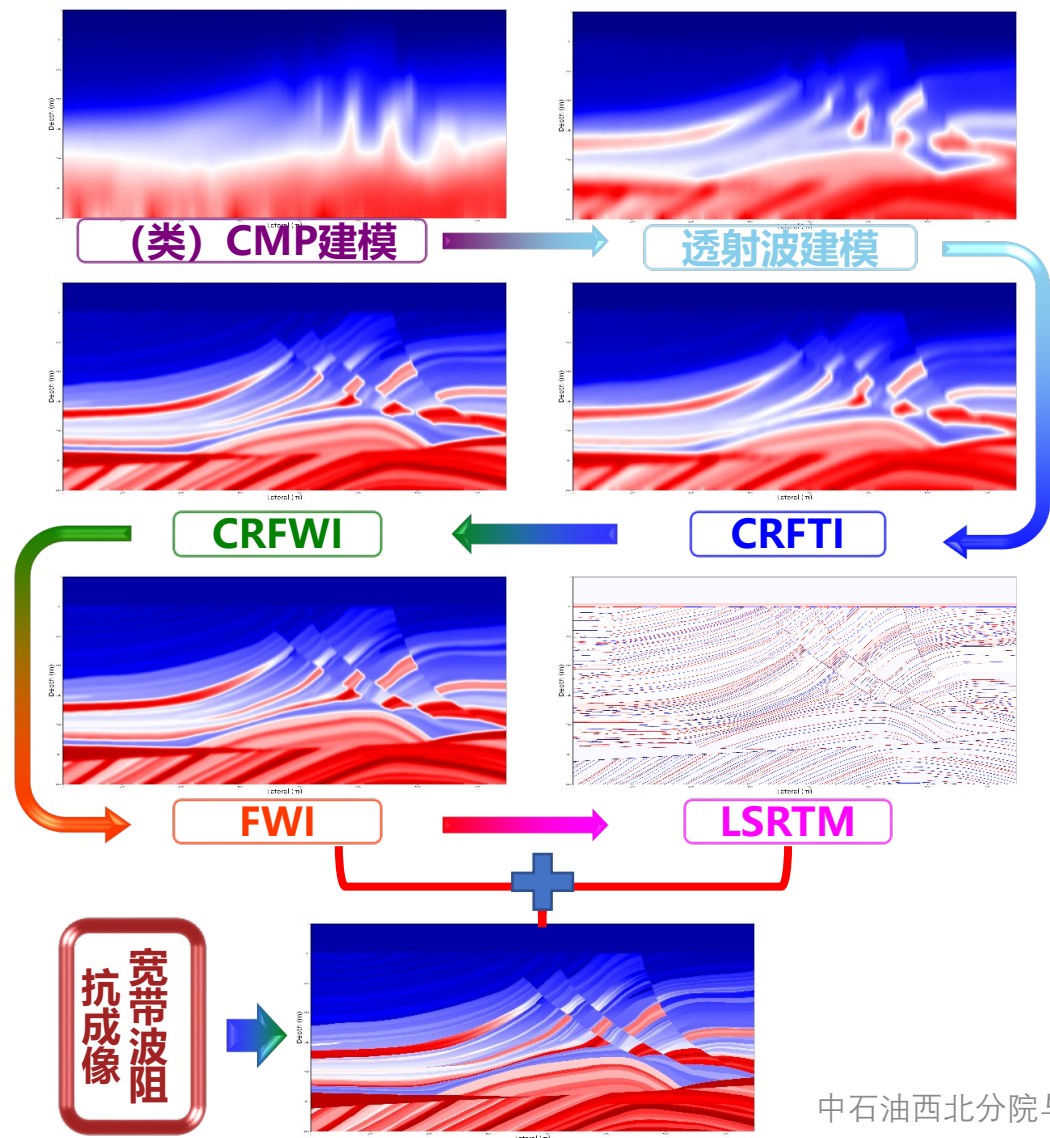
◆用不同的波现象构建不同的反演方法：

◆高波数参数扰动的估计---FWI-Imaging

- ◆道集拉平判断 $v_B(x)$ 的正确性；
- ◆分析中波数参数估计对波场的贡献（敏感度核函数）
- ◆提出提高中波数参数估计精度的方法
- ◆提出把层析梯度项和高波数扰动梯度项分开的方法
- ◆提出让FWI-Imaging更为收敛的方法
- ◆分析层间多次波对成像的贡献以及如何贡献的。

三、特征波反演成像 (CWI)

◆凸的地震波成像技术组合---CWI+宽带波阻抗成像



(Jon F. Claerbout, 1984)



三、特征波反演成像 (CWI)

- ◆ CWI+多信息融合的宽带波阻抗建模是WPI提出的解决非线性成像问题的具体方案。
- ◆ 其中的具体技术环节要不断地深化研究，才能让我们提出的CWI+多信息融合的宽带波阻抗建模方法技术系列逐渐完善起来。

目录

- ◆一、概述
- ◆二、WPI对地震波成像观点
- ◆三、特征波反演成像（CWI）
- ◆四、多信息融合的宽带波阻抗建模
- ◆五、总结与讨论



四、多信息融合的宽带波阻抗建模

◆到底是波阻抗成像或是反射系数成像？

◆地下介质速度参数变化的两种参数化表达方式：

◆基于散射模型的散射势：

◆地下介质以小尺度的、独立分布的散射体为主

◆基于反射模型的反射系数

◆地下以横向连续分布的反射界面为主

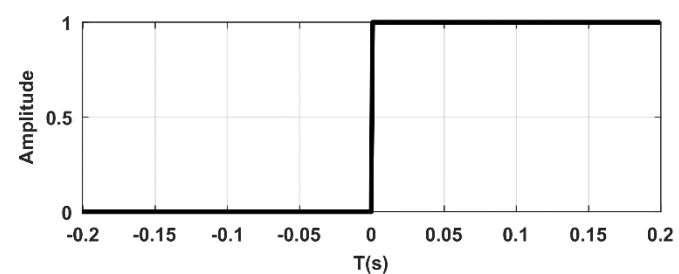
◆地下介质速度参数变化的特征表达：

◆实际地下介质以广泛分布的、横向缓慢变化的层状沉积层为主，地震波与介质之间的作用以反射为主，反射系数更能代表地下介质以层状为主的分布特征。

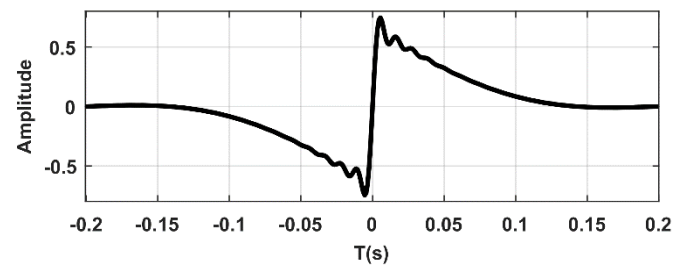
四、多信息融合的宽带波阻抗建模

◆到底是波阻抗成像或是反射系数成像？

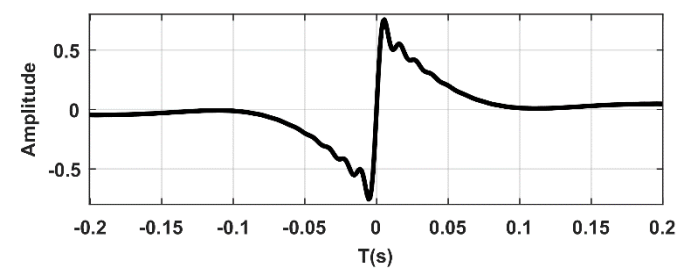
◆ 对于单个水平层，散射势的特征为**阶跃函数**，而反射系数可用**脉冲函数**来表示（Bleistein等，2001）



全频带阶跃函数

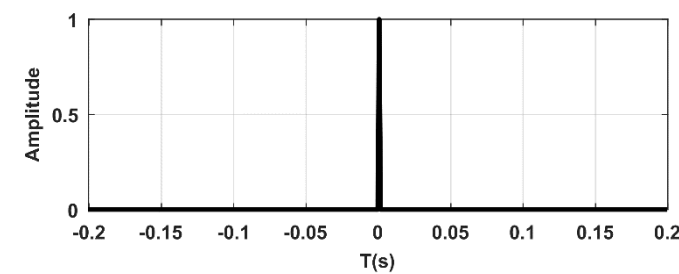


5-80Hz阶跃函数

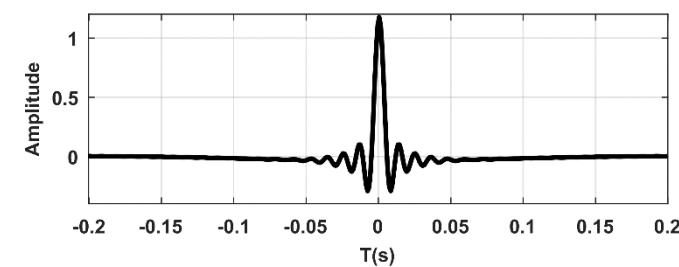


8-80Hz阶跃函数

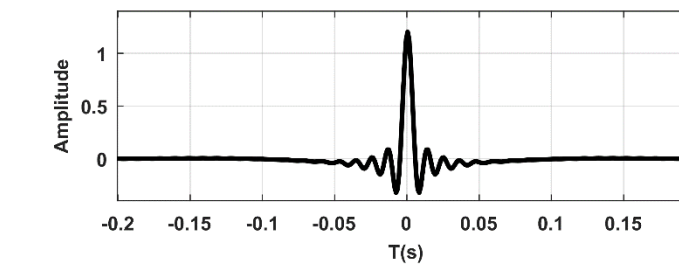
孔径及频带有限的地震数据，波阻抗成像与岩性的关系更密切！更有利于储层解释。



全频带脉冲函数



5-80Hz脉冲函数



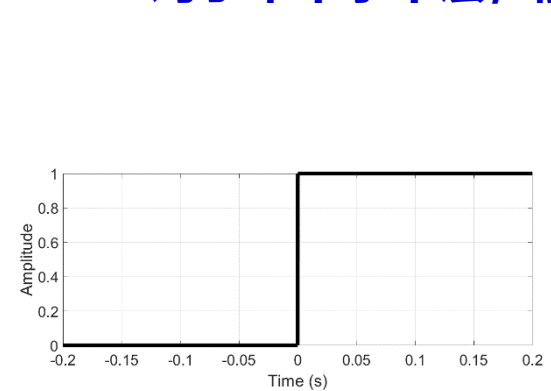
8-80Hz脉冲函数

孔径及频带有限的地震数据，反射系数成像更加稳健！

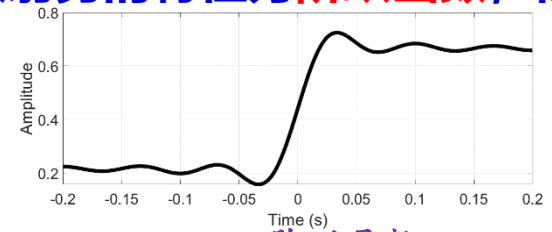
四、多信息融合的宽带波阻抗建模

◆到底是波阻抗成像或是反射系数成像？

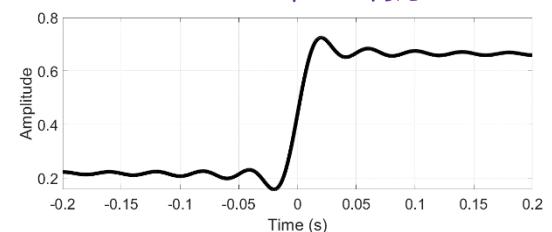
◆ 对于单个水平层，散射势的特征为**阶跃函数**，而反射系数可用**脉冲函数**来表示 (Bleistein等, 2001)



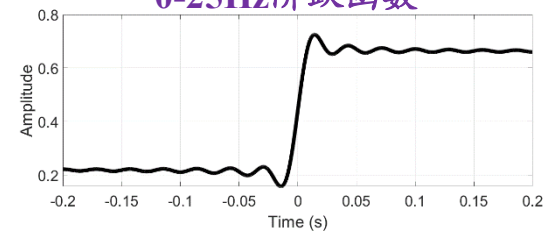
全频带阶跃函数



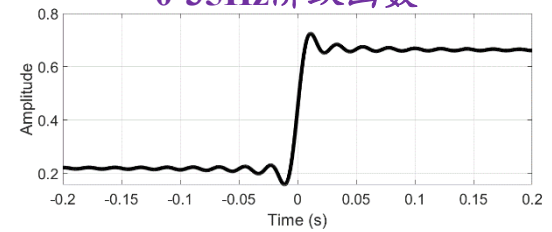
0-15Hz阶跃函数



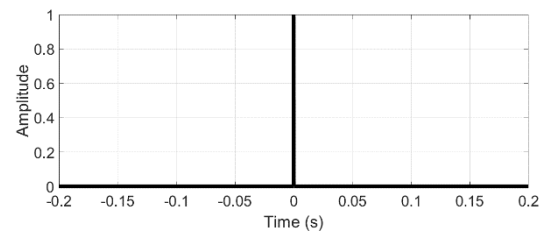
0-25Hz阶跃函数



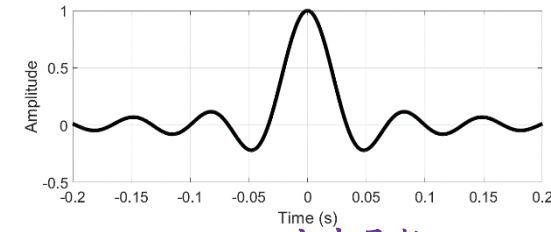
0-35Hz阶跃函数



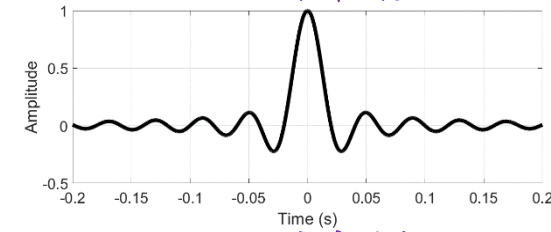
0-45Hz阶跃函数



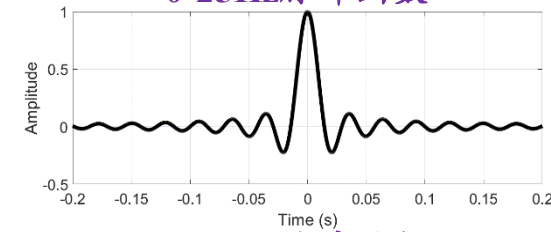
全频带脉冲函数



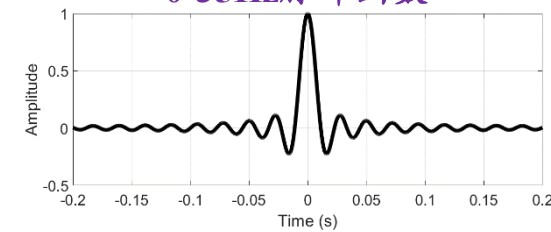
0-15Hz脉冲函数



0-25Hz脉冲函数



0-35Hz脉冲函数



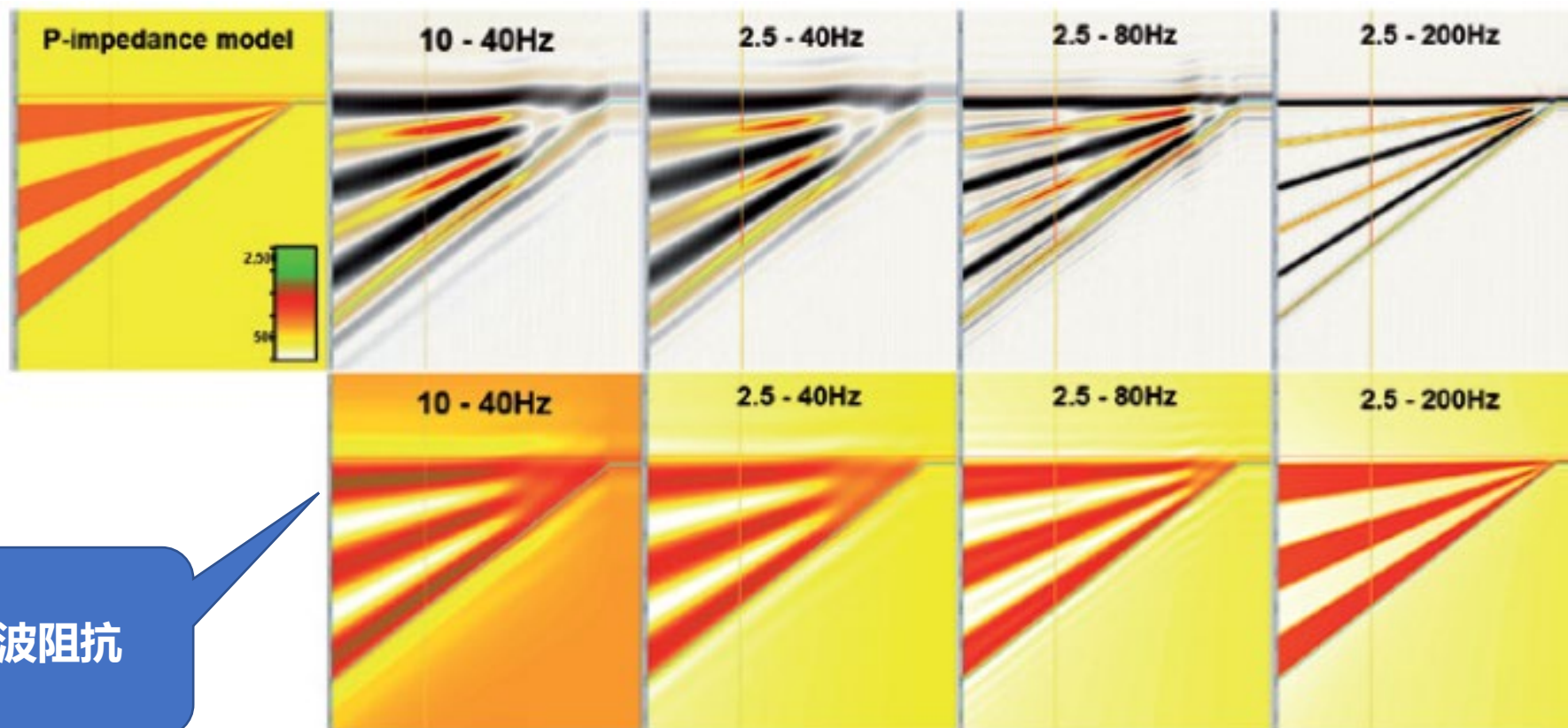
0-45Hz脉冲函数

孔径及频带有限的地震数据，波阻抗成像与岩性的关系更密切！更有利于储层解释。

孔径及频带有限的地震数据，反射系数反演更加稳健！

四、多信息融合的宽带波阻抗建模

◆到底是波阻抗成像或是反射系数成像？



反射系数

波阻抗

宽带波阻抗成像更有利于分辨薄层、小尺度地质体（尖灭）；更有利于储层描述。

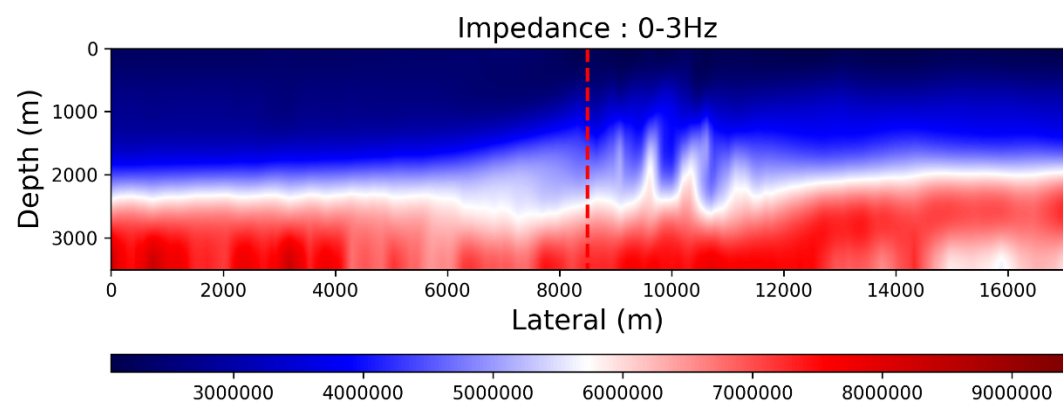


四、多信息融合的宽带波阻抗建模

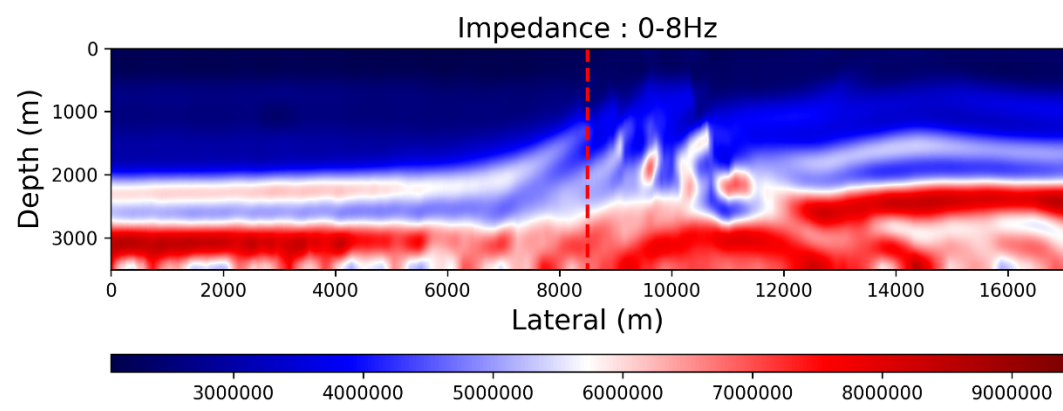
- ◆（角度）反射系数成像，缺失低频时，尽管成像分辨率降低，但**成像稳定性较好**。更适于构造解释。目前的地震地质解释主要还是基于（角度）反射系数的成像叠加剖面
- ◆（角度）反射系数成像与岩性储层的关系不直接，需要进一步的AVA反演估计波阻抗或其他弹性参数。AVA反演的精度没有保障。横向变速情况下，AVA反演理论存在问题。
- ◆**宽带波阻抗成像**，不缺失低频时，成像精度（分辨率）更高，与岩性储层有直接关系，**更适于岩性油藏解释**。

四、多信息融合的宽带波阻抗建模

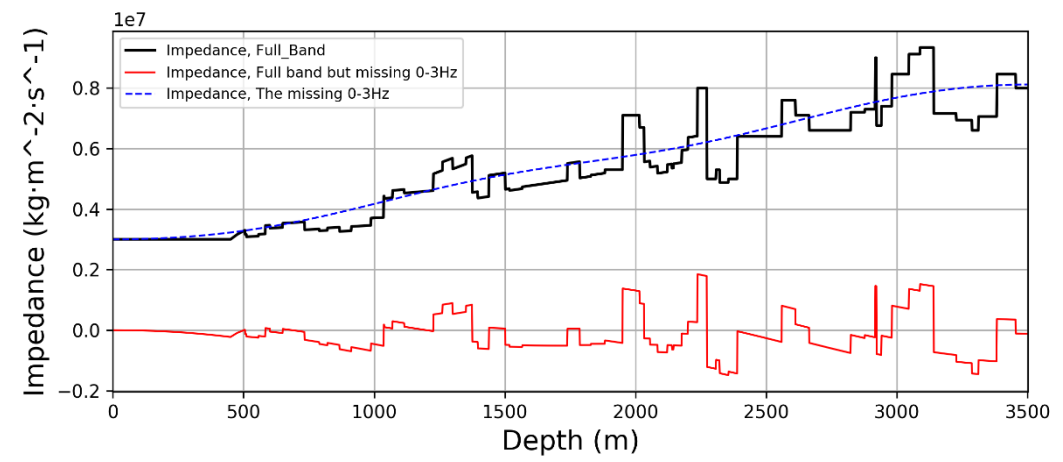
◆不同波数带波阻抗剖面及抽道



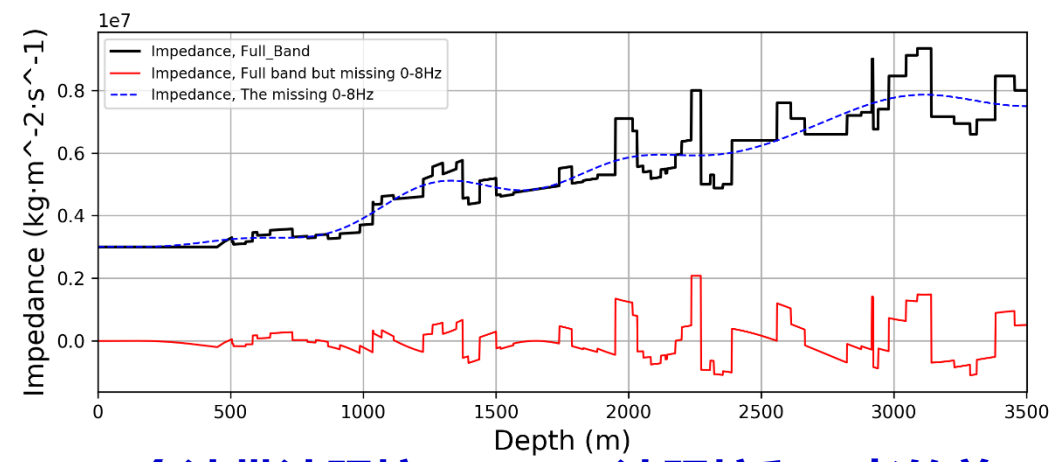
0-3Hz 剖面



0-8Hz 剖面



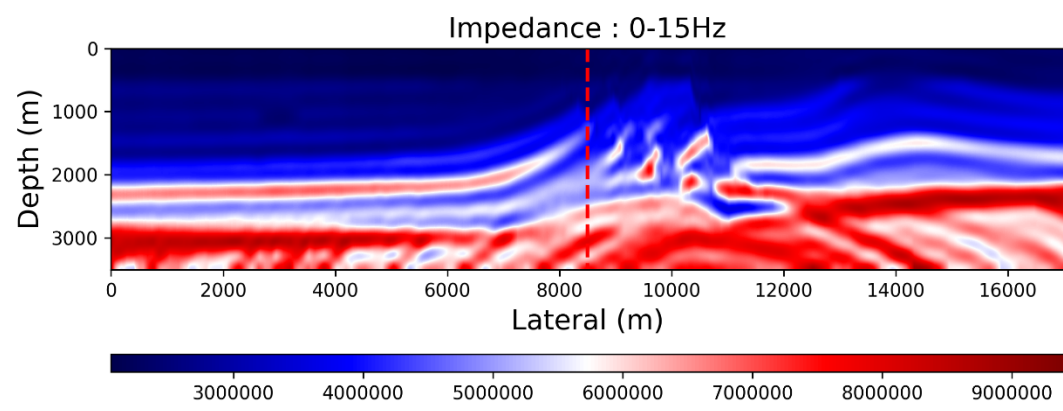
全波带波阻抗, 0-3Hz波阻抗和二者的差



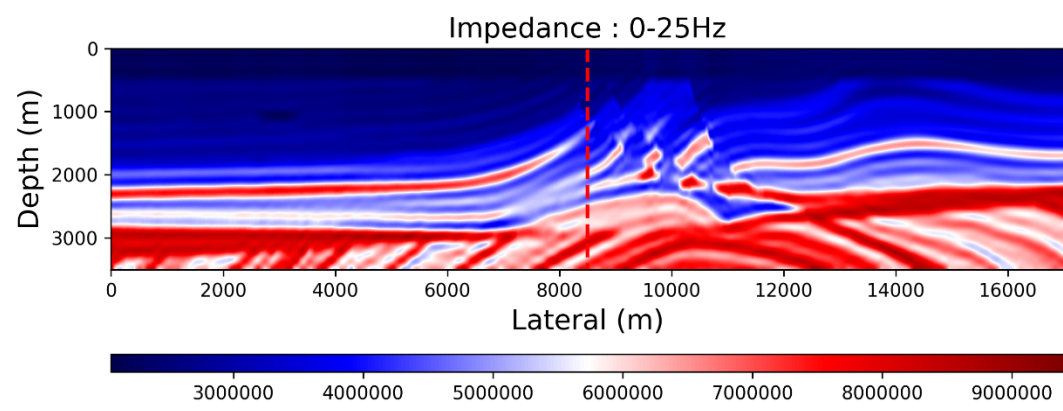
全波带波阻抗, 0-8Hz波阻抗和二者的差

四、多信息融合的宽带波阻抗建模

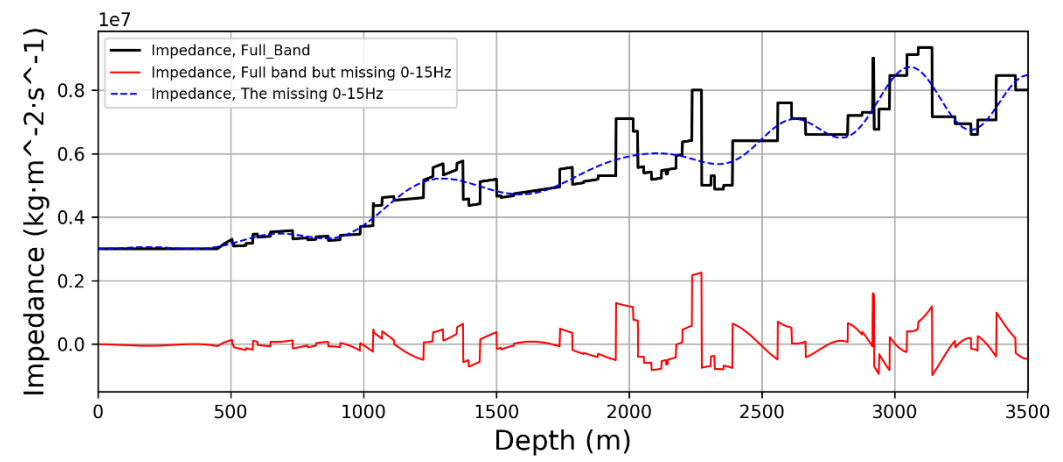
◆不同波数带波阻抗剖面及抽道



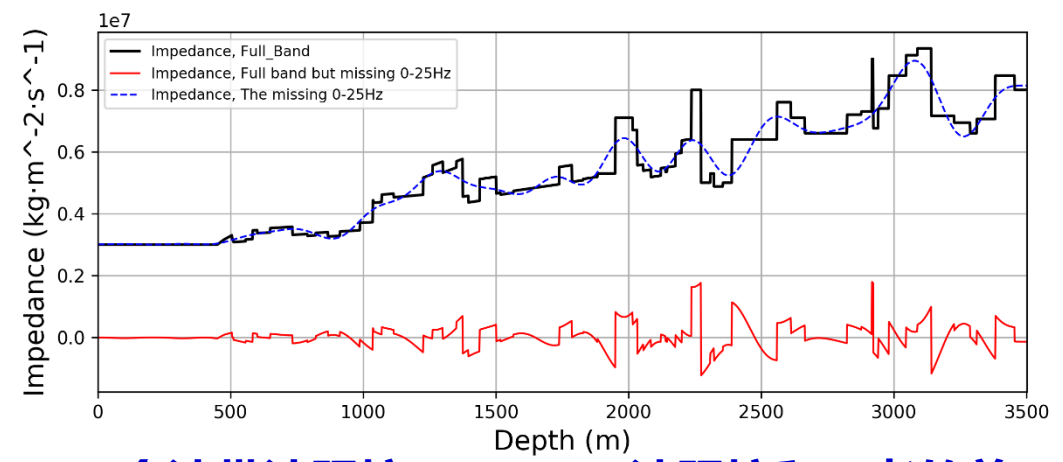
0-15Hz 剖面



0-25Hz 剖面



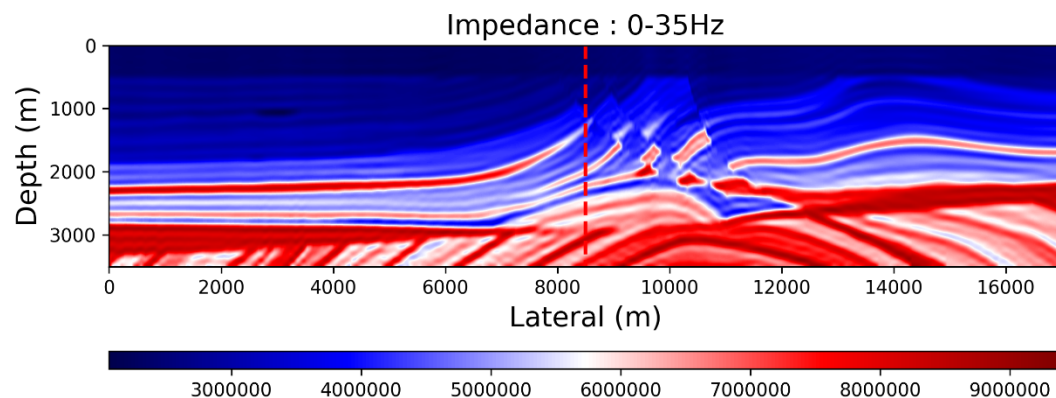
全波带波阻抗, 0-15Hz波阻抗和二者的差



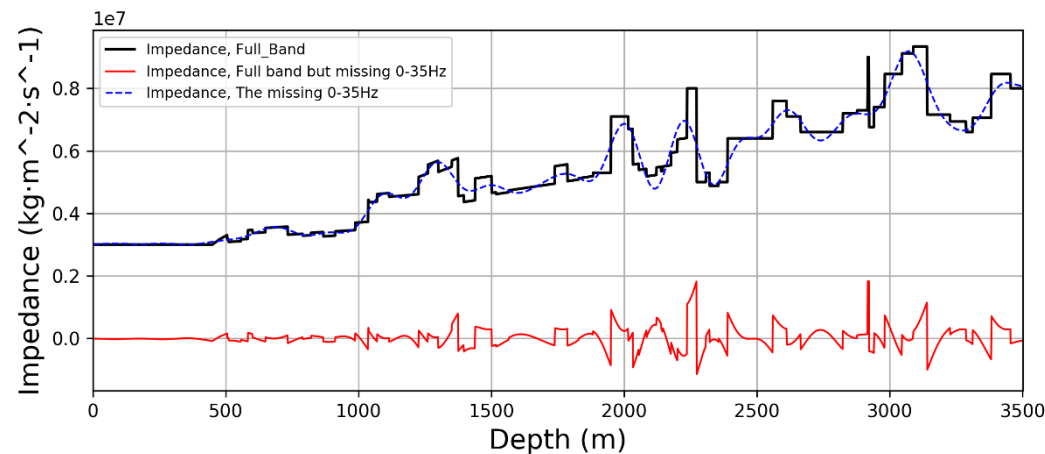
全波带波阻抗, 0-25Hz波阻抗和二者的差

四、多信息融合的宽带波阻抗建模

◆不同波数带波阻抗剖面及抽道



0-35Hz 剖面



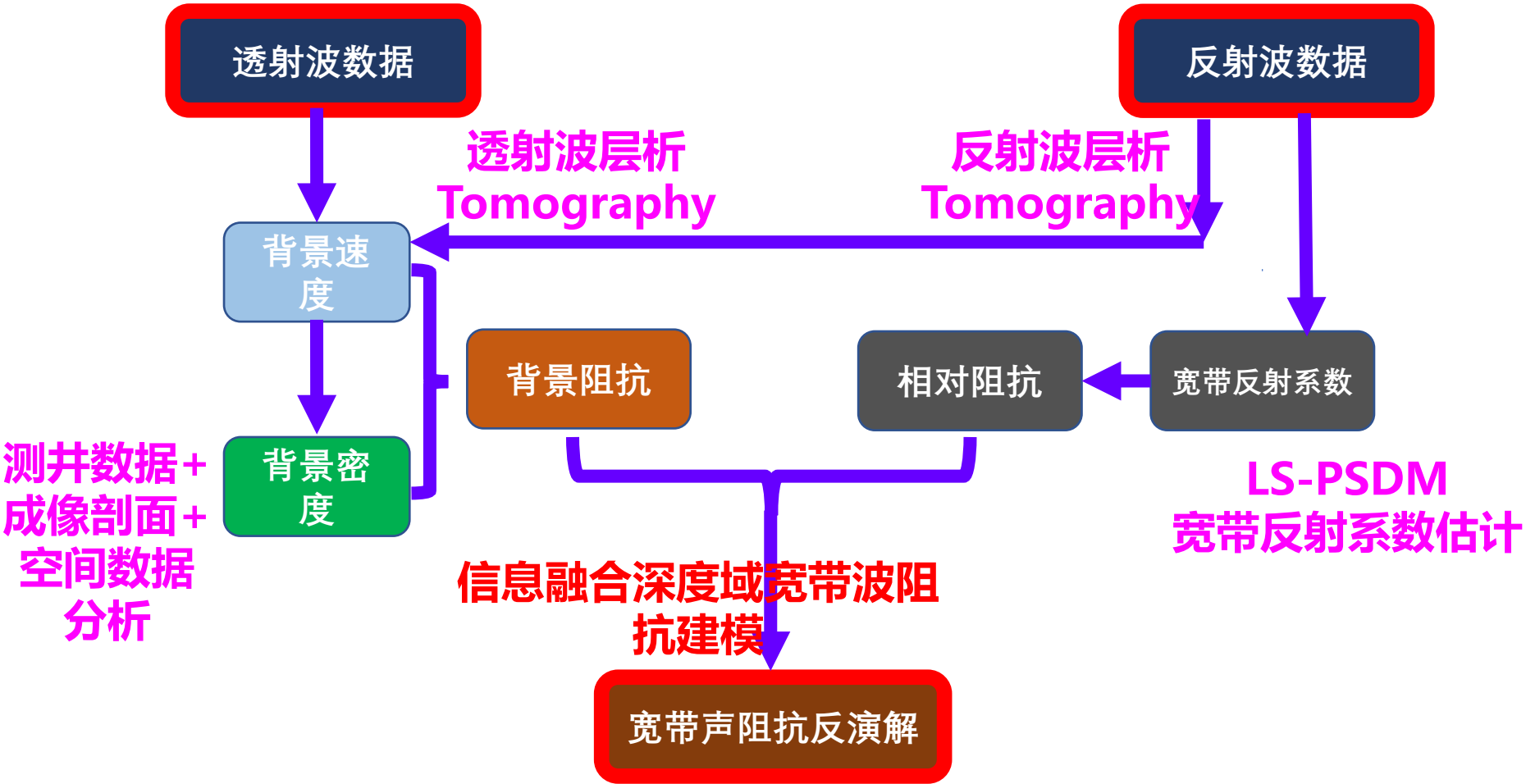
全波带波阻抗，0-35Hz波阻抗和二者的差

◆总结性观点：

- ◆0-50Hz的宽带波阻抗，能清楚地展示地层的几何结构和其中的岩性变化。
- ◆地震波成像的目标应该由宽带反射系数推进到宽带波阻抗。
- ◆基于宽带波阻抗能进行更高精度的地震地质解释和油藏描述。



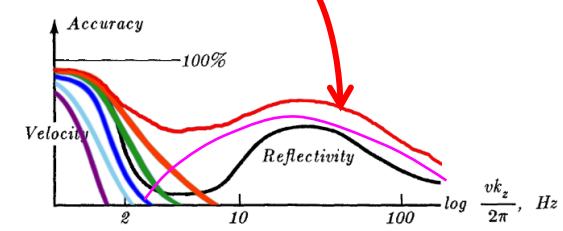
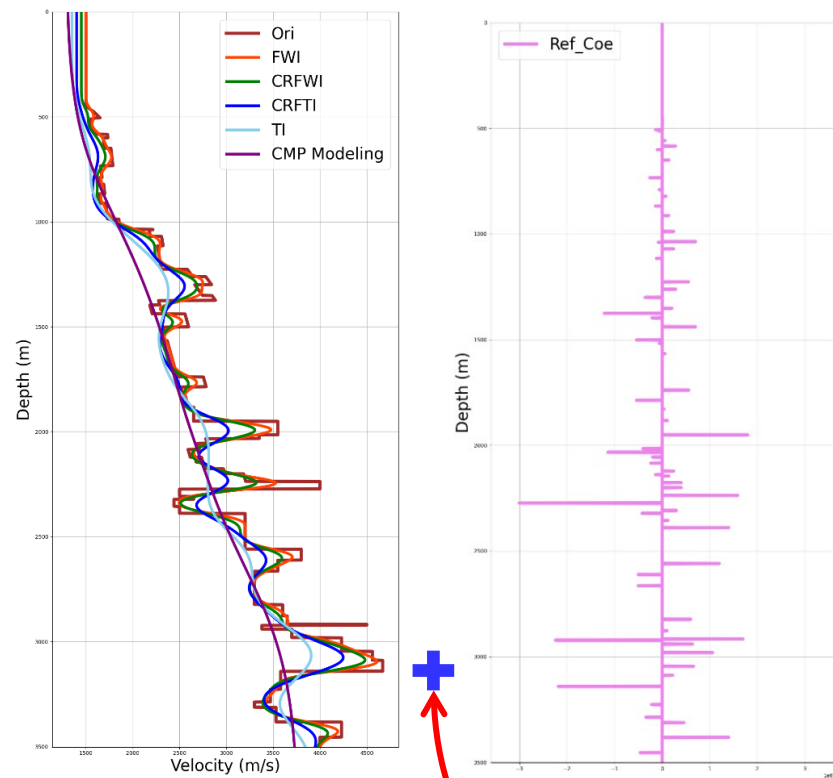
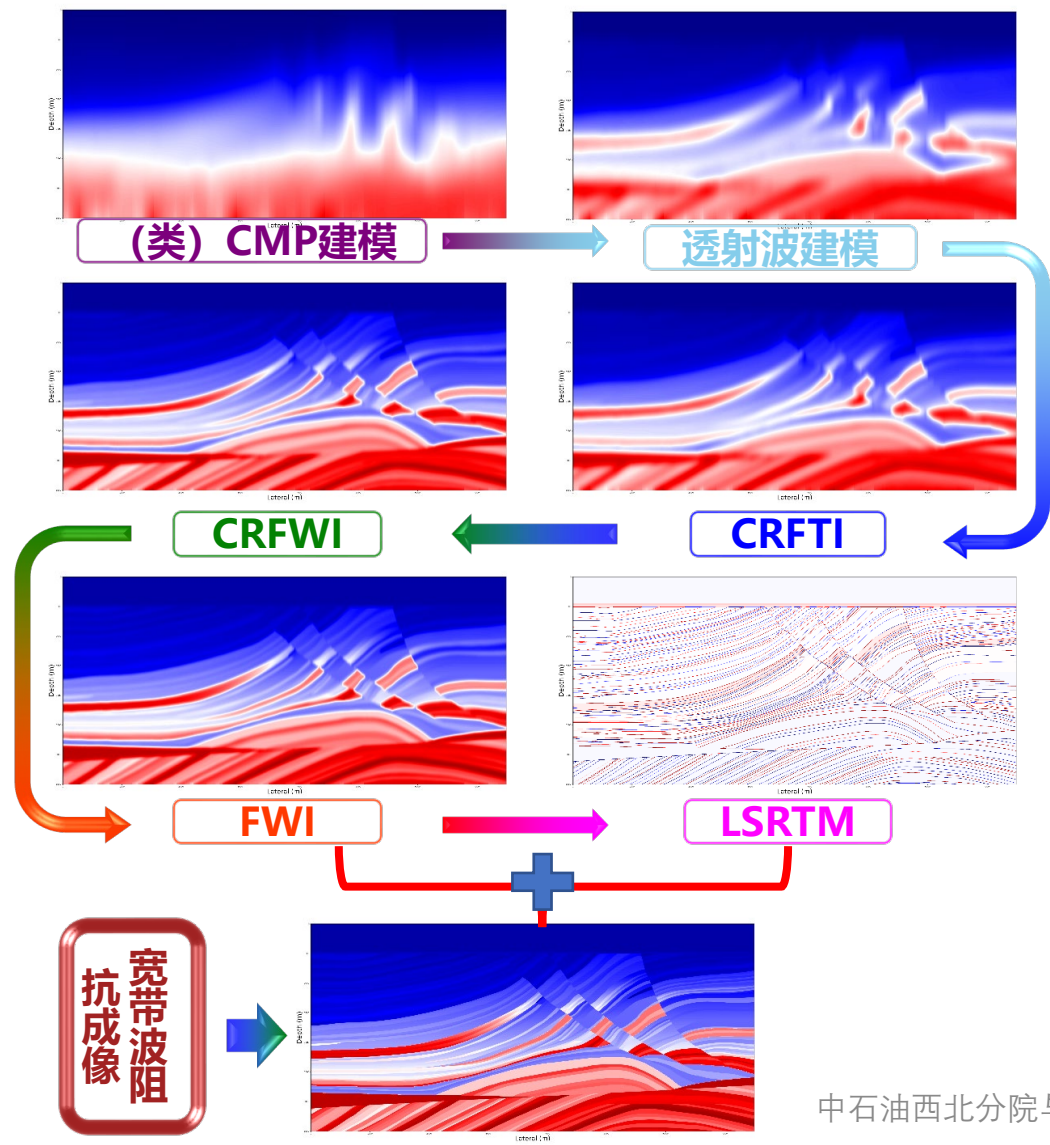
四、多信息融合的宽带波阻抗建模



WPI提出的推进到宽带波阻抗成像的基本技术路线

四、多信息融合的宽带波阻抗建模

◆凸的地震波成像技术组合---CWI+宽带波阻抗成像





四、多信息融合的宽带波阻抗建模

◆ WPI构建的宽带波阻抗建模的三个基本环节：

◆ 1、基于空间数据分析的背景波阻抗模型建立

◆ 在空间数据分析与数据融合理论下，把背景速度模型、井数据、岩石物理数据等融合成背景波阻抗的模型。

◆ 2、超级分辨率地震波保真成像

◆ 利用稀疏反演方法，进一步提高反射系数的成像分辨率。展宽或外延地震优势频段波阻抗成分的低频端和高端。

◆ 3、地震相约束下的宽带波阻抗建模

◆ 提出地震相约束下的宽带波阻抗建模方法，把步骤1和步骤2得到的不同频段的波阻抗成像有机地融合成宽带波阻抗成像结果



四、多信息融合的宽带波阻抗建模

◆WPI构建的宽带波阻抗建模基本路线中的关键技术：

- ◆1、属性参数约束下的散乱数据插值及信息融合；
- ◆2、高精度的速度层析反演及建模；
- ◆3、高分辨率及高保真的角度反射系数成像；
- ◆4、信息融合深度域宽带波阻抗建模；
- ◆5、波阻抗建模结果的统计检验方法。



四、多信息融合的宽带波阻抗建模

◆基于叠前数据的保真角度反射系数成像方法，可以直接由零角度反射系数进行相对波阻抗的成像。

- ◆ 相对波阻抗由于缺低频，不能对岩性油藏进行直接的描述。
- ◆ 直接输出宽带反射系数的成像，更方便与当前的岩性油藏描述方法衔接。

◆Fletcher, et. al (Inversion after depth imaging, SEG, 2012) 提出如下的波阻抗建模方法：

$$J(\mathbf{m}) = \frac{\alpha}{p} \|R(\mathbf{m})\|_p + \frac{1}{2} \|C_d^{-1/2} [HR(\mathbf{m}) - I_{mig}]\|^2 + \frac{1}{2} \|C_m^{-1/2} [\mathbf{m} - \mathbf{m}_0]\|^2$$

◆其中， \mathbf{m} 代表波阻抗模型。 H 代表点扩散函数，由反偏移+偏移过程获得。 R 代表求导算子。 C_d^{-1} / C_m^{-1} 分别代表数据和模型协方差阵的逆。 I_{mig} 代表偏移成像结果。

- ◆ 这种方法考虑的因素太多了！似乎很全面，但很难实用化。



四、多信息融合的宽带波阻抗建模

◆信息融合深度域宽带波阻抗建模：

- ◆把基于“两宽一高”数据的高分辨与高保真角度反射系数的成像独立出去。
- ◆当求得宽带保真的反射系数（5个以上倍频程的空间子波）后，把反射系数转化为相对阻抗，再融合背景阻抗，获得宽带（绝对）波阻抗的估计。
- ◆为了考虑反射系数中的不确定性（误差、噪音），将该问题纳入反问题框架下考虑。
- ◆引入地质逻辑约束的正则化：考虑到地下以层状为主，阻抗模型应该具有块状特征，施加TV正则化对阻抗进行纵、横向约束。



四、多信息融合的宽带波阻抗建模

◆信息融合深度域宽带波阻抗建模:

◆求解如下泛函:

$$\arg \min_{\mathbf{X}} \iint \sqrt{(\nabla_x \mathbf{X})^2 + (\nabla_t \mathbf{X})^2} dx dt \quad s.t. \begin{cases} \|\nabla_t \mathbf{X} - \mathbf{R}\|_2^2 < \varepsilon \\ \mathbf{X}_{low} = \mathbf{LX} \end{cases}$$

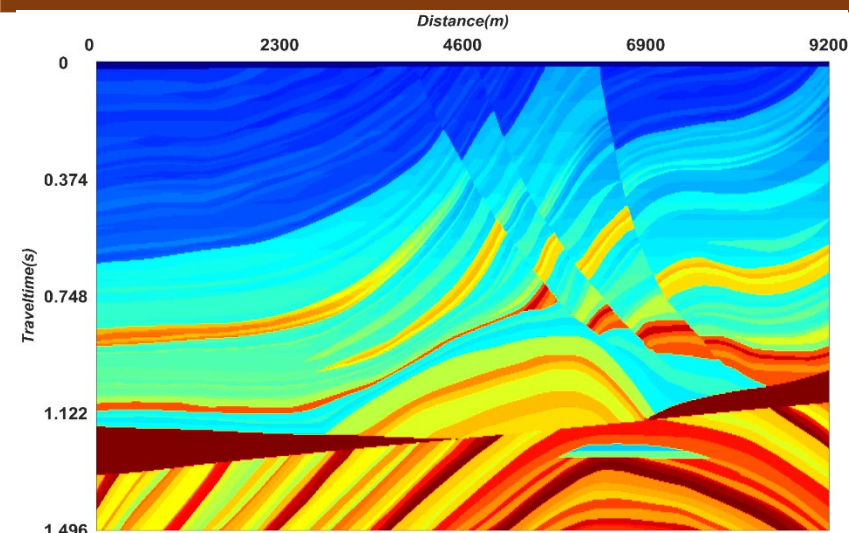
◆其中, $\mathbf{R} = (\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_M)$ 为一个矩阵, 代表反射系数剖面, 有 M 道。

$\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_M)$ 代表阻抗的对数剖面, 有 $\mathbf{x}_i = (1/2) \ln(\mathbf{z}_i)$

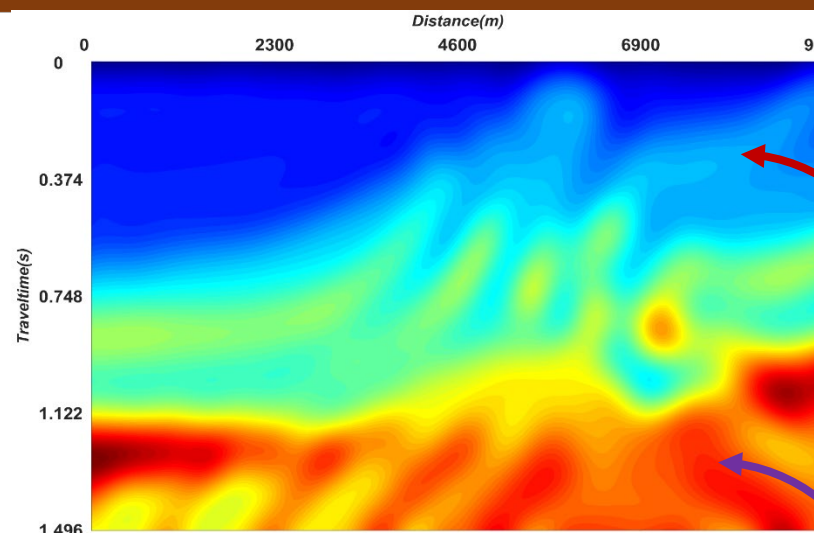
◆等式约束项使得反演的绝对阻抗的背景成分与给定的背景阻抗相一致。 \mathbf{X}_{low} 代表给定背景阻抗的对数剖面, \mathbf{L} 代表低通滤波算子, 频带与给定背景阻抗的频带一致。

◆求解得到 \mathbf{X} 后, 可通过 $\mathbf{Z} = \exp(2\mathbf{X})$ 得到绝对阻抗。

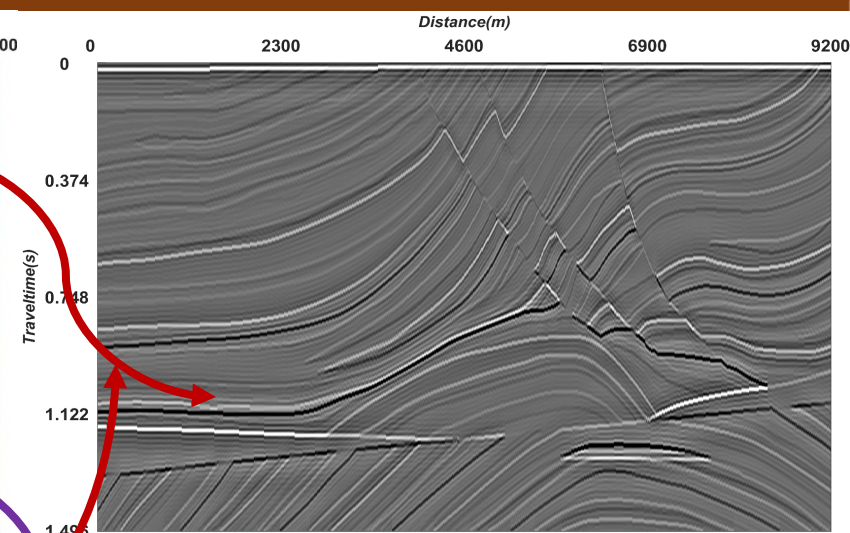
四、多信息融合的宽带波阻抗建模



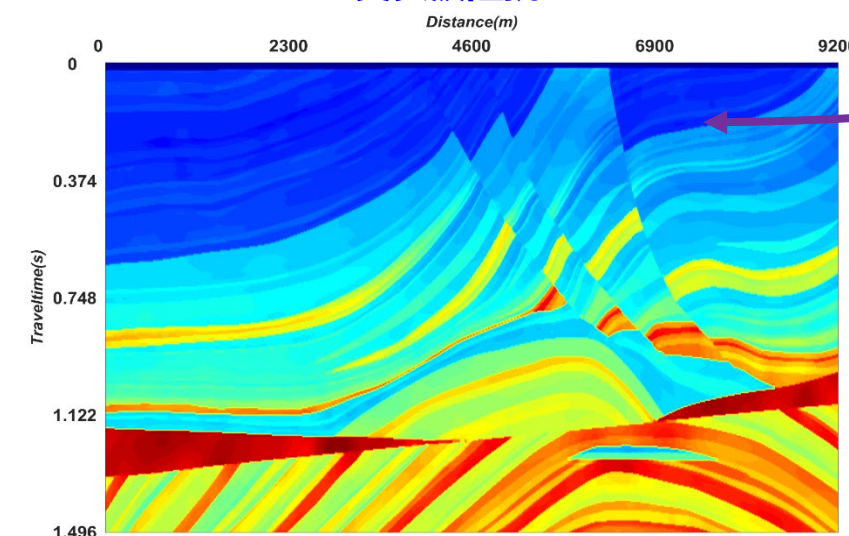
真实波阻抗



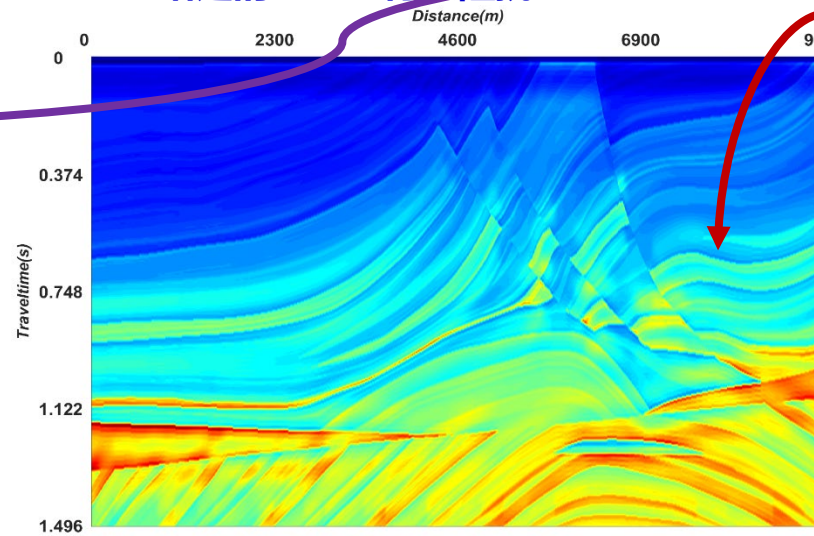
给定的0-2Hz背景阻抗



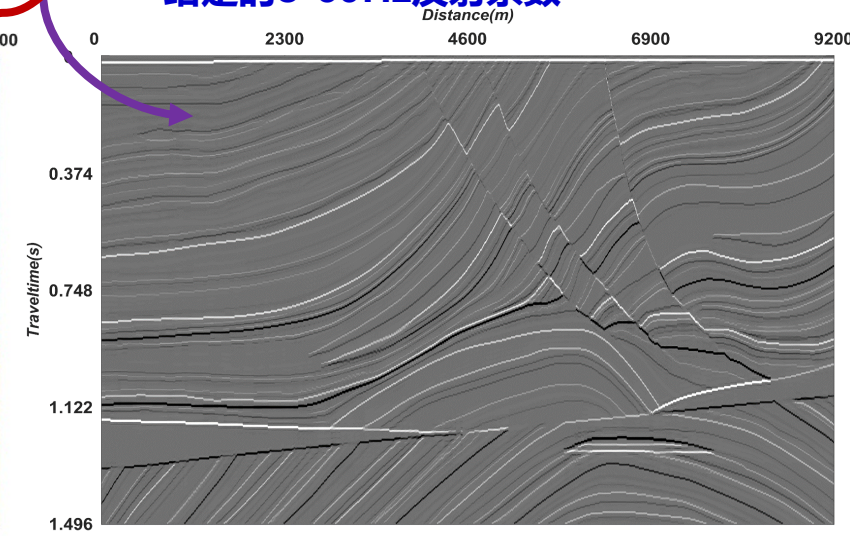
给定的8-60Hz反射系数



利用给定的背景阻抗与施加稀疏约束得到的反射系数估计的绝对阻抗，中频间隙得到了填补。



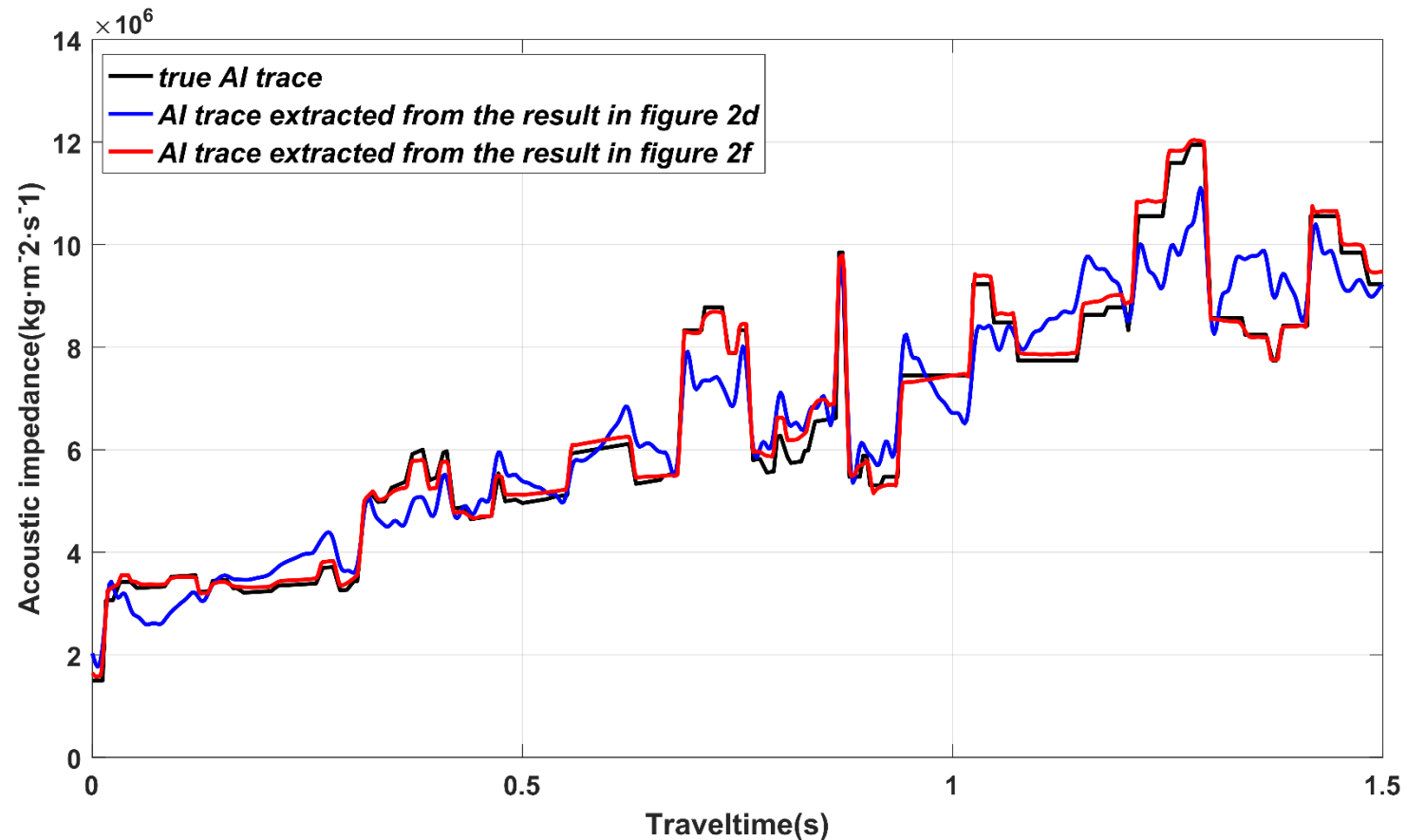
给定0-2Hz背景阻抗与8-60Hz反射系数反演得到的绝对阻抗估计，缺失中频成分



对反射系数施加稀疏约束，估计得到的更宽带的反射系数

四、多信息融合的宽带波阻抗建模

◆抽道对比（最中间一道）：

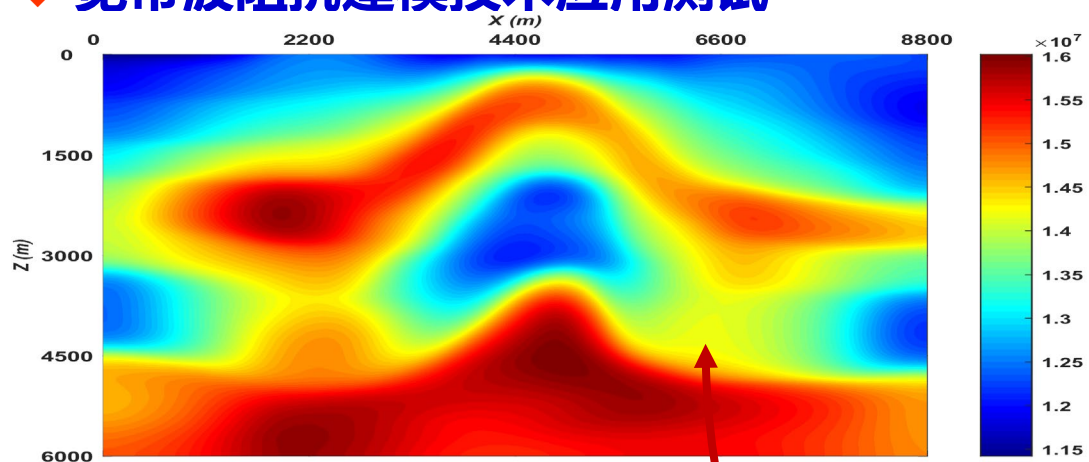


黑色：真实阻抗；蓝色：利用给定数据得到的缺失中频的估计结果；
红色：利用稀疏约束得到的反射系数、给定的背景阻抗估计的结果

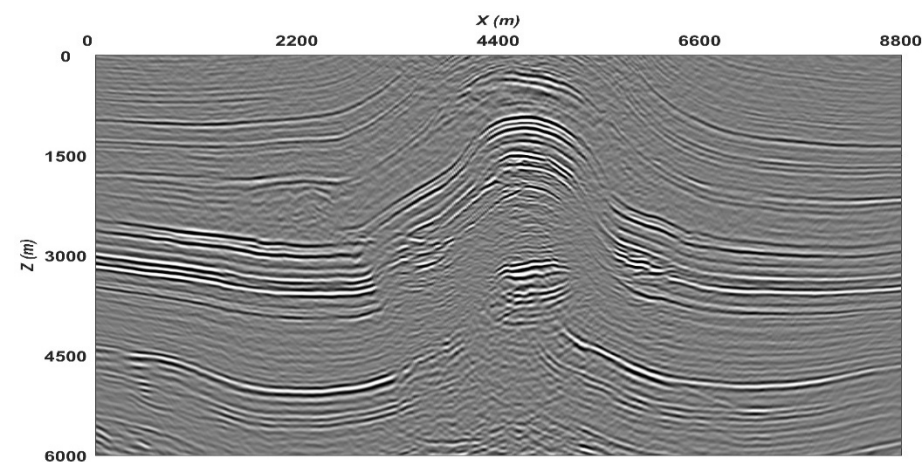
四、多信息融合的宽带波阻抗建模

◆ 宽带波阻抗建模技术的实用化

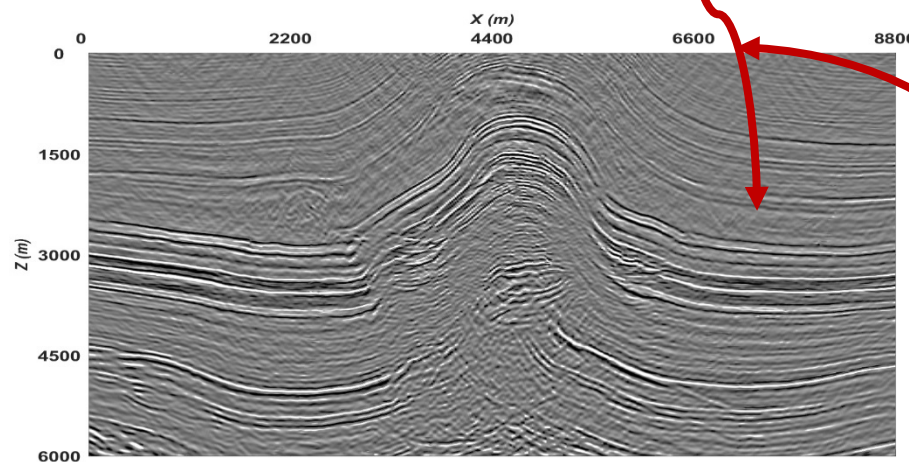
◆ 宽带波阻抗建模技术应用测试



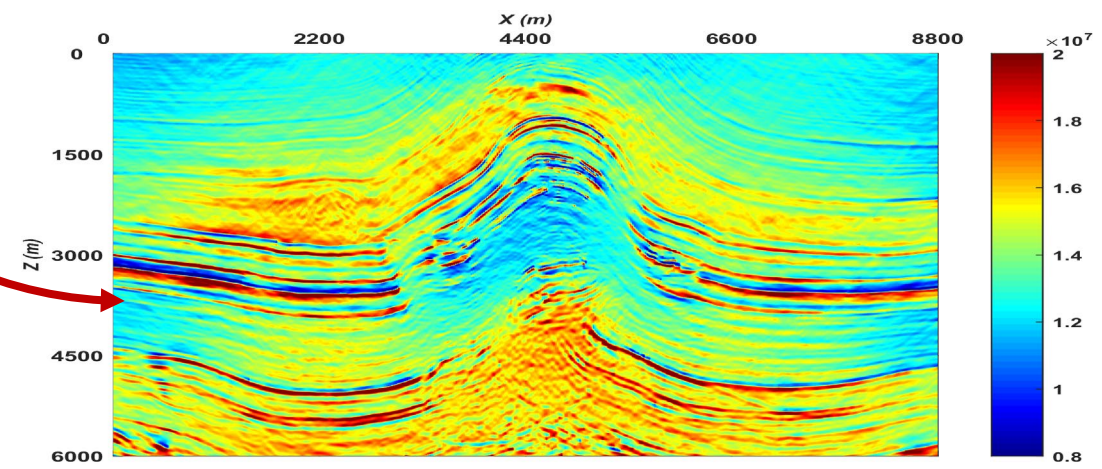
已知的背景阻抗模型；假设密度为常密度 $2500kg/m^3$



常规偏移成像结果



成像域LS-PSDM反射系数反演结果

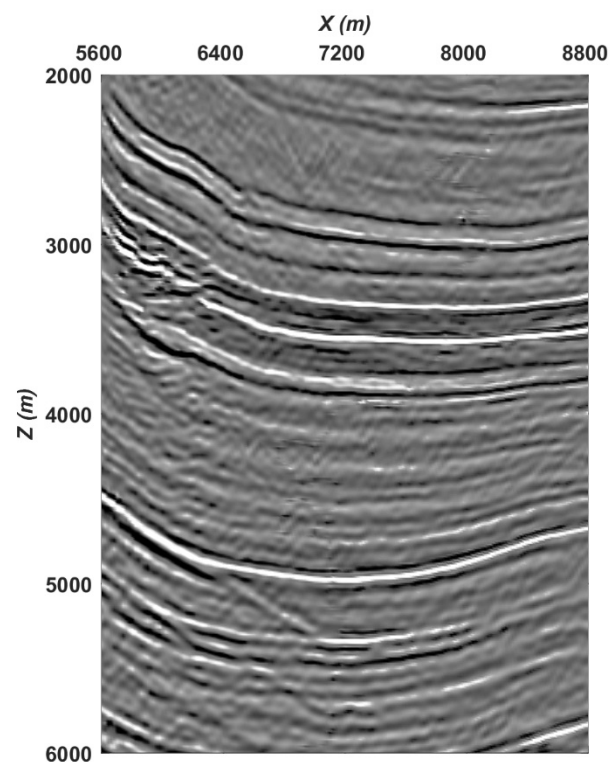


“宽带”声阻抗反演结果

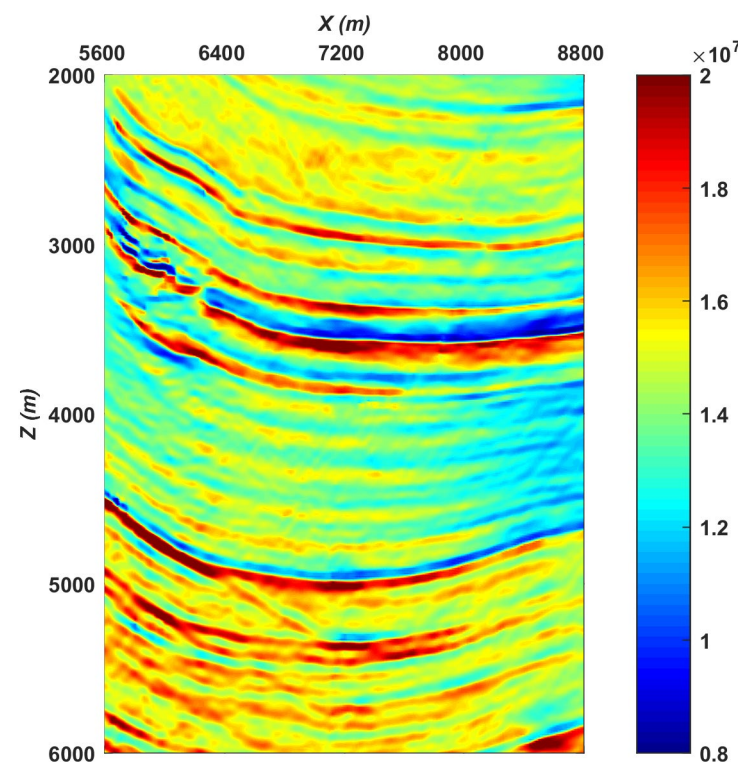
四、多信息融合的宽带波阻抗建模

◆ 宽带波阻抗建模技术的实用化

◆ 宽带波阻抗建模技术应用测试



成像域LS-PSDM反射系数反演结果



声阻抗反演结果

目录

- ◆一、概述
- ◆二、WPI对地震波成像观点
- ◆三、特征波反演成像（CWI）
- ◆四、多信息融合的宽带波阻抗建模
- ◆五、总结与讨论



五、总结与讨论

- ◆地震波成像（弹性参数估计）总是一个信息不足情形下的（强）非线性反问题。
- ◆到目前为止，并不存在一个普适性的求解（强）非线性反问题的数学工具。
- ◆实际物理系统的参数估计问题不是一个纯数学问题，可以说是Bayes估计理论（理念）指导下的、获得有意义的反问题解的实践活动。
 - ◆所以Hadamard之前的数学家会认为解反问题是荒谬的！但是，解反问题却又绝对是必要的。对数学和物理问题的透彻理解是解决好反问题的唯一途径。
- ◆求解（强）非线性反问题的基本逻辑：
 - ◆把强非线性的参数估计反问题转化为一组较凸的反问题进行求解。



五、总结与讨论

- ◆特征表达系统参数与特征表达地震波场是把强非线性的弹性参数反演问题转化成凸问题的根本逻辑。
- ◆WPI提出了特征波反演成像（CWI）理念，其核心是建立特征参数与特征波场之间的近似线性的关系。基于CWI，提出了推进到宽带波阻抗建模的、面向岩性油藏的地震波成像技术路线。
- ◆地震波反演成像本质上永远会是一个信息不充分情况下的决策问题（或参数估计问题）！“两宽一高”的数据采集的充分实现，其他与介质参数相关的信息的采/收集永远是提高成像质量的关键问题。



五、总结与讨论

- ◆勘探地震中，“两宽一高”数据采集技术+广义的地震波反演成像技术（推进到宽带波阻抗成像）+多种信息融合的油藏描述与评价技术，始终是三个核心问题。
- ◆大数据和人工智能时代，机器学习类算法能否在勘探地震数据分析中起到颠覆性作用？目前看来机器学习类算法只是在去噪、初至拾取、速度谱自动解释、层位追踪等等凡是适合学习类算法应用的场景中逐步得到了应用。机器学习类算法可以辅助进行特征波同相轴和特征反射层位的识别，能有提高建模的精度。
- ◆我们认为：机器学习类算法不擅长系统参数估计问题（即地震波成像问题）的解决。选择机器学习类算法擅长的应用场景是最关键的。



谢谢
欢迎批评指正