



波现象与智能反演成像研究组



从成都青岛海口和上海论坛会议看地震波成像发展

报告人：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

2023年05月11日

目录

- ◆ **一、概述**
- ◆ **二、双复杂及深层超深层成像问题的解决方案**
- ◆ **三、预处理方面的问题及可能的解决方案**
- ◆ **四、弱信号的本质及弱扰动成像问题**
- ◆ **五、定量地震波成像的真正障碍及解决方案**
- ◆ **六、层间多次波引起的问题及解决方案**
- ◆ **七、总结与讨论**

◆一、概述

◆我国西部各大油气盆地边缘都存在有复杂山前带与前山带油气地震勘探探区，譬如塔里木盆地、四川盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地等，已经有了很多重大的油气勘探发现，已经成为了我国油气勘探的战略探区。

◆库车山前带、四川盆地周边已经成为我国新的、重要的油气产区。

◆深层超深层油气藏，无论从勘探效益，资源禀赋或是勘探潜力上看，都是今后油气勘探的重点领域。

◆煤层气、致密油气、页岩油气的勘探，显然又是一个与众不同的油气藏模式。同时也是资源量巨大的新勘探领域。

◆一、概述

- ◆新的勘探领域、新的介质情况、新的油气藏类型必然导引出新的问题。
- ◆能否用一个复杂的方程，在Bayes参数估计理论下，类似FWI方法，一劳永逸地、自动地解决地震波成像问题？看起来，是没有希望的！尤其针对双复杂及深层超深层成像问题，这样的技术方案是行不通的。
- ◆整个勘探地震的历史发展，都是针对问题需求，发展出一套适用的方法与技术，而不是硬解一个看起来完美的数学问题。

目录

- ◆ 一、概述
- ◆ 二、双复杂及深层超深层成像问题的解决方案
- ◆ 三、预处理方面的问题及可能的解决方案
- ◆ 四、弱信号的本质及弱扰动成像问题
- ◆ 五、定量地震波成像的真正障碍及解决方案
- ◆ 六、层间多次波引起的问题及解决方案
- ◆ 七、总结与讨论

◆二、双复杂及深层超深层成像问题的解决方案

◆“双复杂”及深层超深层探区油气勘探的问题：

- ◆地表高程剧烈变化，地层发生推覆、褶皱形成复杂的构造，含油气目标往往在推覆构造的下方，使得复杂地表、复杂构造、深层超深层勘探目标三个复杂因素叠加在一起。
- ◆评价认为山前带与前山带推覆构造带深层超深层油气勘探成为了世界级油气勘探难题一点也不为过。

◆二、双复杂及深层超深层成像问题的解决方案

◆“双复杂”及深层超深层探区油气勘探的问题：

◆山前带与前山带推覆构造区深层超深层油气勘探中，地下介质的几何形态成像和弹性参数成像精度远远不能满足：对深层油气藏的成藏特征形成规律性认识；对深层油气藏进行可靠的评价；指导安全快速地开展钻井和完井。

◆总而言之，参数估计问题/地震波成像问题才是“双复杂”及深层超深层探区油气勘探“卡脖子”的问题。

◆二、双复杂及深层超深层成像问题的解决方案

◆“双复杂”探区地震波成像的真正难题：

- ◆剧变的道间时差+（极）低信噪比数据情形下，满足高精度地震波成像需求的（各向异性）速度模型的建立。
- ◆地震波反演成像是信息不足情形下的最佳决策问题。“双复杂”探区速度模型建立是一个真正意义下的反问题。信息不足是高精度地震波成像的重要障碍。



◆二、双复杂及深层超深层成像问题的解决方案

◆解决“双复杂”及深层超深层探区地震波成像问题的基本逻辑：

◆寻找最稳健的方法技术的组合，而不是用所谓最先进的技术组合；用多信息综合约束的思想方法，解决高精度地震波成像问题。

◆二、双复杂及深层超深层成像问题的解决方案

◆解决“双复杂”探区地震波成像问题的方案及关键技术：

- ◆① 选择合适的基准面，消除高频道间时差；
- ◆② 结合大炮波场特征并基于电磁雷达波高光谱分析的近地表岩性智能区划及数字露头重建；
- ◆③ 高维多属性Markov最佳状态转移决策初始波识别+波动理论初至波层析成像；
- ◆④ 炮检邻域内叠前数据非线性Beam同相叠加提高叠前数据的信噪比；
 - ◆4.1 高频道间时差消除；
 - ◆4.2 基于波动方程预测+减去的面波（散射）压制。
 - ◆SWAMI方法也归结于此。



◆二、双复杂及深层超深层成像问题的解决方案

◆解决“双复杂”探区地震波成像问题的方案及关键技术：

- ◆⑤ 基于CRS叠加概念的TTI Kirchhoff积分PSDM，形成（极）低信噪比数据地震波成像核心技术，服务于深层反射波CIG道集层析速度建模；
- ◆⑥ 基于特征反射结构及其他综合信息约束的反射波中深层速度建模；
- ◆⑦ 基于叠前数据空间与叠前成像空间的共轭性，开展成像道集后处理，消除速度不正确、照明不均匀、子波不一致、偏移噪音，产生最佳成像结果。



◆二、双复杂及深层超深层成像问题的解决方案

◆解决深层超深层成像问题的方案及关键技术：

◆核心思想：成像道集为中心的保真高分率成像

◆保真高分辨的具体含义是：带限反射系数成像结果是无旁瓣或弱旁瓣的。

◆二、双复杂及深层超深层成像问题的解决方案

◆解决深层超深层成像问题的方案及关键技术：

◆本质含义：实现同一反（散）射点的、不同Offset的反（散）子波的同相位叠加。

地震波成像得到的带限反射系数

$$\hat{R} = \frac{w_{OR}(t)}{w_{SO}(t)} = \frac{|c_{OR}| w_S(t) e^{-i\omega t_{OR}} e^{-i\phi_{OR}} \cdot R}{|c_{SO}| w_S(t) e^{-i\omega t_{SO}} e^{-i\phi_{SO}}}$$

$$= \frac{|c_{OR}|}{|c_{SO}|} \frac{w_S(t)}{w_S(t)} \cdot R \cdot e^{-i\omega(t_{SO}-t_{OR})} e^{-i(\phi_{SO}-\phi_{OR})}$$

$$= |c'| \cdot R \cdot e^{-i\omega(t_{SO}-t_{OR})} e^{-i(\phi_0^S - \phi_0^R)}$$

地震波传播的几何图景

幅值变化：球面扩散校正、地表一致性振幅校正、吸收衰减校正和透射损失等有关。

地震反射层的真反射系数

初相位：由激发接收和介质吸收作用引起。

传播相位：由从浅到深的全部偏移速度场决定

保真与高分辨地震波成像的数学物理关系



◆二、双复杂及深层超深层成像问题的解决方案

◆解决深层超深层成像问题的方案及关键技术：

◆关键技术：

- ◆① 子波形态和振幅一致性处理；
- ◆② 地表相关噪音压制；
- ◆③ 吸收衰减补偿；
- ◆④ 高精度各向异性速度建模
- ◆⑤ 照明非均匀校正
- ◆⑥ 层间多次波压制
- ◆⑦ 无旁瓣或弱旁瓣的带限反射系数生成

目录

- ◆一、概述
- ◆二、双复杂及深层超深层成像问题的解决方案
- ◆三、预处理方面的问题及可能的解决方案
- ◆四、弱信号的本质及弱扰动成像问题
- ◆五、定量地震波成像的真正障碍及解决方案
- ◆六、层间多次波引起的问题及解决方案
- ◆七、总结与讨论

◆三、预处理方面的问题及可能的解决方案

◆定量地震波成像对“噪声”去除的新要求：

- ◆针对实际应用，去噪音一直是高精度地震波成像的重要障碍。定量地震波成像中，噪音影响会更严重。
- ◆但是，当前的去噪方法与技术已很难有显著进步。
 - ◆抽象的模式：高维空间中，满足时距关系的同相轴飘在满足不同统计特征的随机噪声中。
 - ◆从信号处理角度，去噪音的方法已经研究得很彻底了。除非进行非线性信号预测。但这不是短时间内会有结果的。
 - ◆深度学习（DL）算法的去噪，在勘探地震中，目前的做法也就那样了，不可能有令人惊奇的结果出现。
- ◆地震勘探的噪音本质上是自由地表相关的波传播物理过程决定的。去噪应该与参数估计（成像）融为一体。这应该是今后去噪的真正研究方向。

◆三、预处理方面的问题及可能的解决方案

◆Berkhout教授的非凡眼光：

◆1988年制定的研究团队学术方向：

- ◆在弹性波方程正问题框架下，重点针对如下三方面问题
- ◆1、自由地表相关波现象或噪音的消除；
- ◆2、角度成像道集的生成；
- ◆3、基于角度成像道集的岩性参数反演。

◆三、预处理方面的问题及可能的解决方案

◆海上水体及海底附近介质建模及基于该模型的噪音压制：

◆1、海上水体及海底附近介质建模：

◆2、基于该模型的噪音压制；

◆编码与解码的鬼波压制；

◆水体相关多次波的压制；

◆基于波动方程正演模拟预测与减去的噪音压制

预测+减去与预测+反演是数据处理领域解决问题的基本模式。

◆三、预处理方面的问题及可能的解决方案

◆陆上近地表建模及基于该模型的噪音压制：

◆1、近地表介质建模：

◆2、基于该模型的噪音压制；

◆基于波动方程外推与能量切除的噪音压制

◆SWAMI面波预测与面波压制

◆基于波动方程正演模拟预测与减去的噪音压制

预测+减去与预测+反演是数据处理领域解决问题的基本模式。

目录

- ◆ 一、概述
- ◆ 二、双复杂及深层超深层成像问题的解决方案
- ◆ 三、预处理方面的问题及可能的解决方案
- ◆ 四、弱信号的本质及弱扰动成像问题
- ◆ 五、定量地震波成像的真正障碍及解决方案
- ◆ 六、层间多次波引起的问题及解决方案
- ◆ 七、总结与讨论



◆四、弱信号的本质及弱扰动成像问题

- ◆从波传播的物理过程看，深层超深层油气勘探中，所谓的弱信号，应该指的是弱反（散）射同相轴，或弱反（散）射成像结果。二者是同一个物理源，一个在数据域看；一个在成像域看。
- ◆所谓弱信号的称谓是不合理的，会引起误解的。就应该直接称：弱反射/弱绕射，而不应笼统地称弱信号。
- ◆浅、中、深层都会有弱反射和/或弱散射同相轴。

◆四、弱信号的本质及弱扰动成像问题

- ◆如果真正实现了保真高分辨成像，就没有什么弱反射和强反射需要区分的问题。
- ◆因此，工业界很多人讲的“弱信号”问题，本质上是个保真高分辨成像问题。
- ◆解决所谓的“弱信号”问题最后的归属是：无旁瓣或弱旁瓣（再加上窄主瓣）反射系数估计问题。
 - ◆不伤害相邻弱反射的、无旁瓣或弱旁瓣（再加上窄主瓣）反射系数估计（成像）结果，应该比较彻底地解决了所谓的“弱信号”问题。



◆四、弱信号的本质及弱扰动成像问题

- ◆至于深层弱反射（散）射信号在数据域中容易被伤害的问题，是与当前基于信号处理的线性信号预测+减去的去噪方法有关的。
- ◆用强、弱信号混在一起的局部高维数据，建立预测器，去预测其中的信号，由于预测器不完美，会伤害弱的反（散）射信号。
- ◆当前，所有预处理环节，都要注意深层弱反射/散射信号的保护。
- ◆只有把深层弱反射/散射信号的保护起来，保真高分辨成像才有数据基础。
- ◆但是，这是很难做到的！
- ◆当前阶段，保真去噪需求很明显。实现保真去噪的合理途径应该是：基于物理模型的噪声（波现象）预测+减去！



◆四、弱信号的本质及弱扰动成像问题

- ◆总而言之，针对深层超深层油气储层的成像，预处理阶段和反演成像阶段都要有新的认识和新的做法。
- ◆预处理阶段主要是在去噪中保护弱反射/绕射波；成像阶段主要是得到保真高分辨的成像结果，尤其不要出现**强旁瓣压制弱反射系数**的现象。
- ◆事实上，得到**保真高分辨**的成像结果对于浅、中、深反射层都是必要的。
- ◆事实上，浅层弱反射/绕射也是要保护的。



◆四、弱信号的本质及弱扰动成像问题

- ◆对于深层反射，尤其是弱的深层反射而言，球面扩散校正、吸收衰减校正、透射损失校正、照明不均匀校正，在成像过程中更要特别注意。
- ◆对于深层超深层油气勘探，层间多次波（的干扰成像结果）对于深层超深层弱反（散）射波的成像结果的影响应该是很显著的。

目录

- ◆ 一、概述
- ◆ 二、双复杂及深层超深层成像问题的解决方案
- ◆ 三、预处理方面的问题及可能的解决方案
- ◆ 四、弱信号的本质及弱扰动成像问题
- ◆ 五、定量地震波成像的真正障碍及解决方案
- ◆ 六、层间多次波引起的问题及解决方案
- ◆ 七、总结与讨论

◆五、定量地震波成像的真正障碍及解决方案

◆基于振幅的、定量的地震波成像的本质含义：

- ◆基于走时反演背景速度的FWI，已经非常清楚了。
- ◆基于振幅的高波数参数的定量估计（或成像），这是还没有既定解决方案和做法的问题。
- ◆高波数参数的参数化方法各家都不一样。
- ◆背景速度（背景阻抗）当然会与（不同参数化形式的）高波数参数量纲不同。两类量纲不同的东西融合在一起，自然要基于信息融合的算法。
- ◆因此，基于振幅的高波数参数的定量估计（或成像）一定是高波数参数估计的研究重点。

◆五、定量地震波成像的真正障碍及解决方案

◆基于振幅的、定量的地震波成像的本质含义：

◆在FWI过程中，剥离出高波数参数引起的梯度响应是理论预计的、高波数参数估计核心方向。

◆据此，CGG公司的FWI_Imaging、英国帝国理工Warner教授的全频带FWI，PGS公司的背景速度与反射系数同时反演，本质上都是在处理FWI高波数参数引起的梯度响应得到高波数扰动的估计。

◆但是，这三种做法并不能自动得到定量的高波数估计结果。

◆Inversion Crime意义下是可以的。可以得到定量的高波数估计结果。但是，得到宽带参数估计，即便Inversion Crime意义下也不行，反演参数的量纲可能不同。

◆五、定量地震波成像的真正障碍及解决方案

◆与当前国际上几种典型的类似做法的对比

$$\frac{\partial^2 P}{\partial^2 t} - v^2 \rho \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla P \right) = S \quad Z = v\rho \quad \frac{\partial^2 P}{\partial^2 t} - vZ \nabla \cdot \left(\frac{v}{v\rho} \nabla P \right) = S \Rightarrow \frac{\partial^2 P}{\partial^2 t} - vZ \nabla \cdot \left(\frac{v}{Z} \nabla P \right) = S$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial^2 t} - vZ \nabla \cdot \left(\frac{v}{Z} \nabla P \right) = S$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial^2 t} - \left[v^2 \nabla^2 P + v \nabla v \cdot \nabla P - \frac{\nabla Z}{Z} v^2 \nabla P \right] = S$$

$$R^0 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \approx \frac{1}{2} \frac{d_z Z}{Z}$$

$$\nabla Z = i \cdot d_x Z + j \cdot d_y Z + k \cdot d_z Z$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial^2 t} - \left[v^2 \nabla^2 P + v \nabla v \cdot \nabla P - 2R^0 \cdot v^2 \nabla P \right] \approx S$$

PGS公司FWI所用的正问题

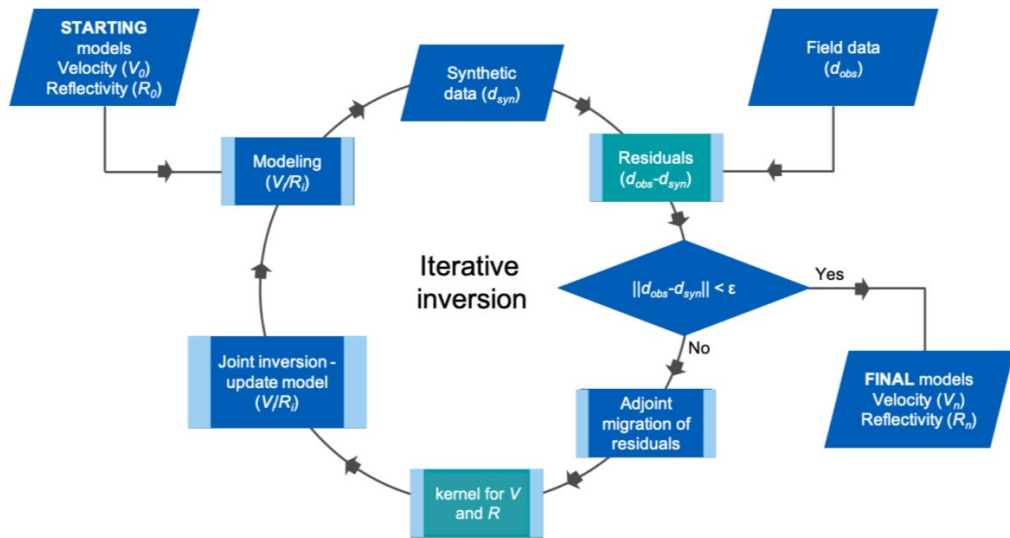


Figure 1 A schematic of the full wavefield velocity and reflectivity simultaneous inversion approach.

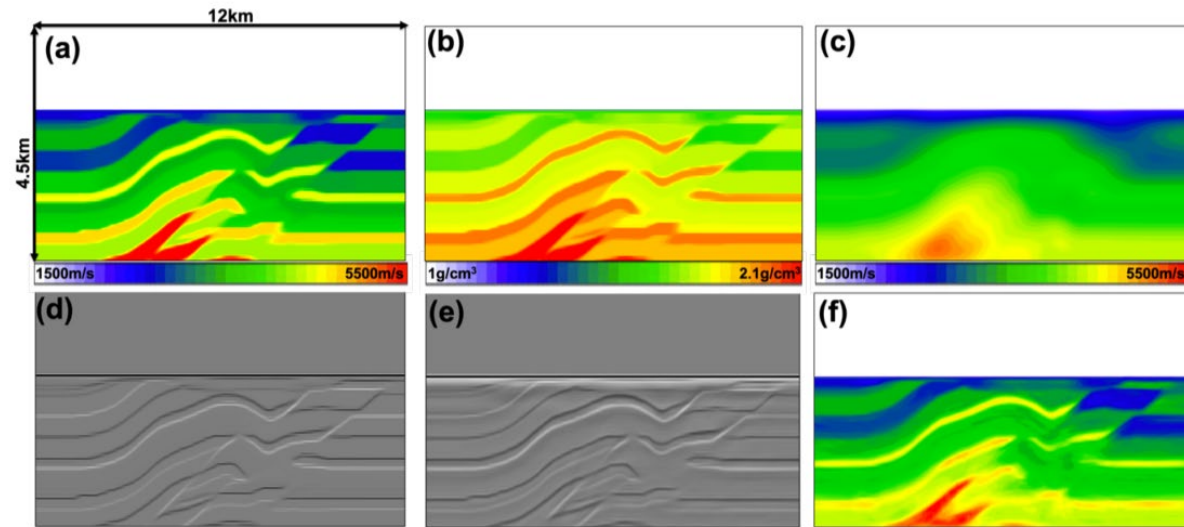
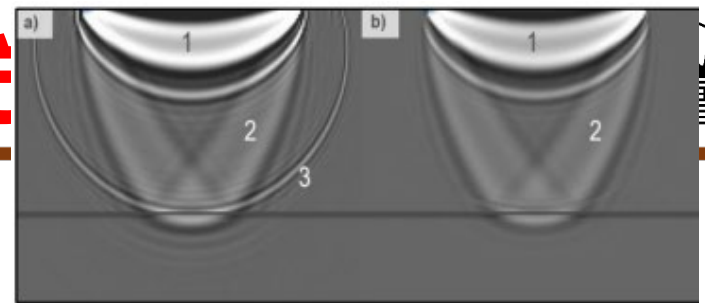


Figure 1: Overthrust model synthetic test example. True velocity (a) and density (b) model. (c) Initial velocity model. (d) True vertical reflectivity. (e) Inverted vertical reflectivity and (f) velocity from the simultaneous inversion.

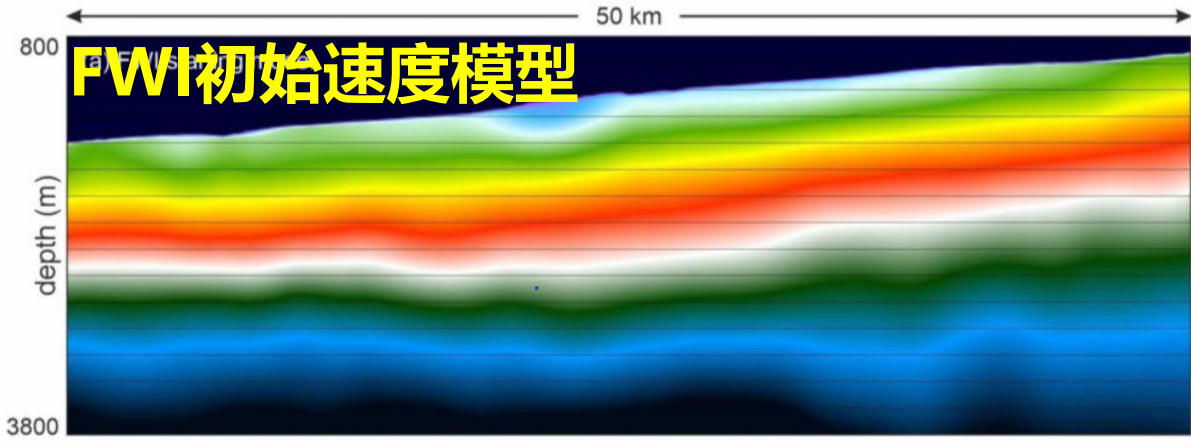


◆五、定量地震波成像的真正障碍及解决方

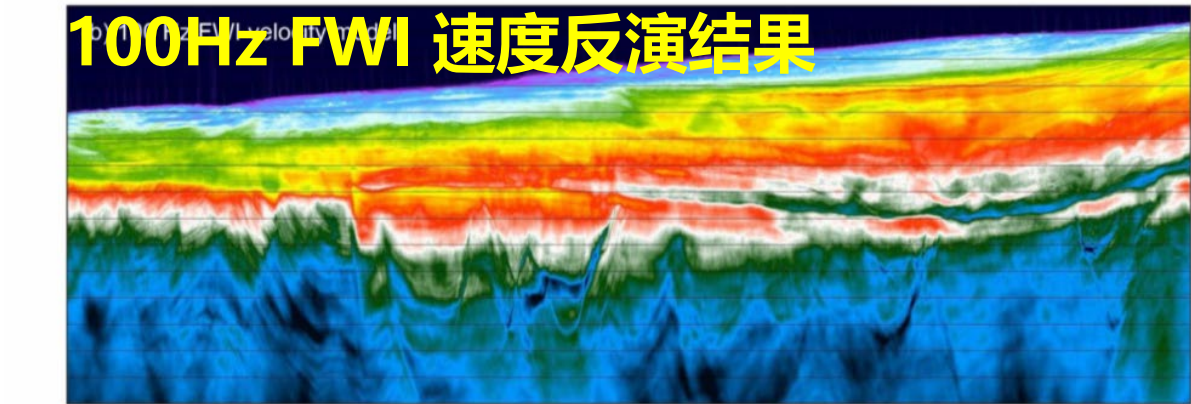
◆与当前国际上几种典型的类似做法的对比



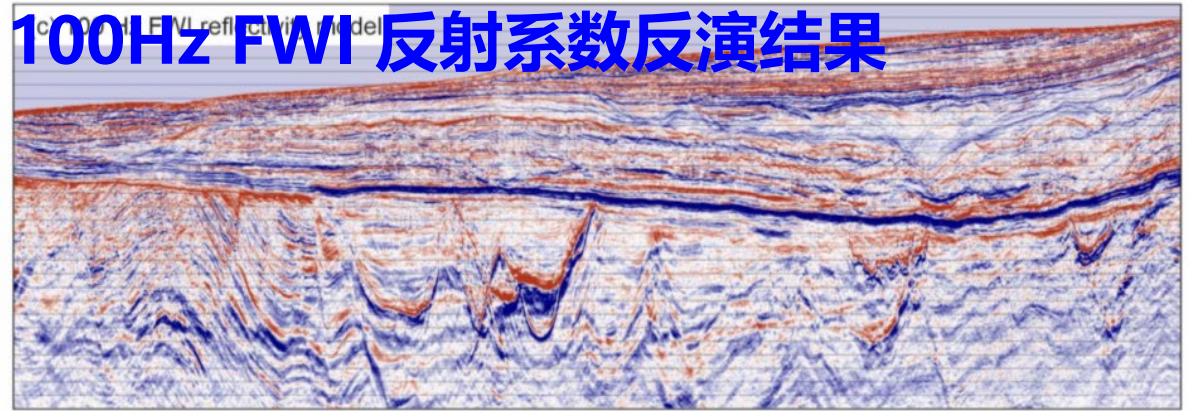
核心思想无非是迭代过程中分开“层析响应”和“偏移响应”



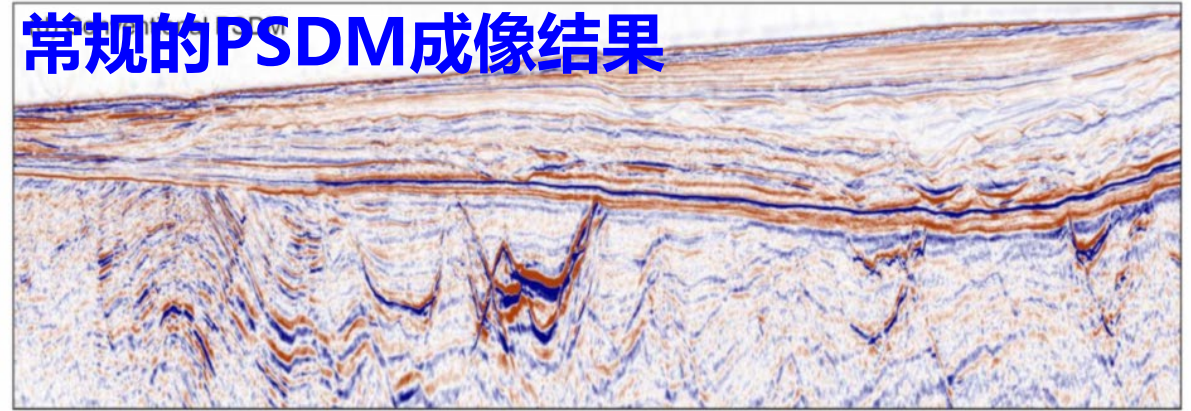
FWI初始速度模型



100Hz FWI 速度反演结果



100Hz FWI 反射系数反演结果



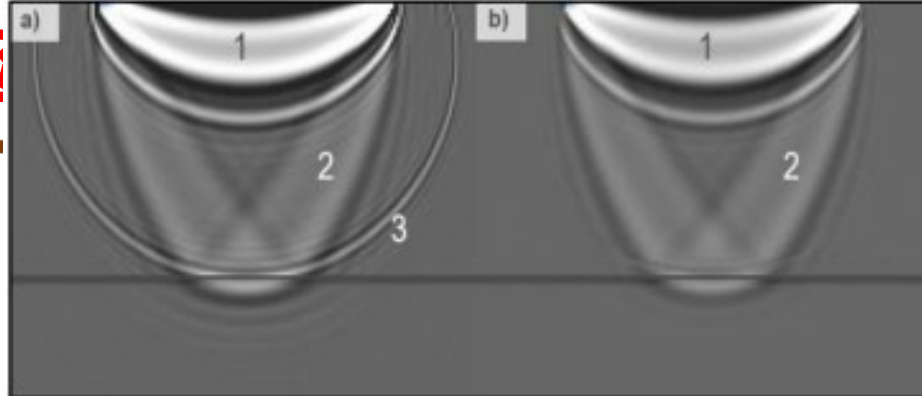
常规的PSDM成像结果

帝国理工大学Warner教授给出的全频带FWI的思想与方法

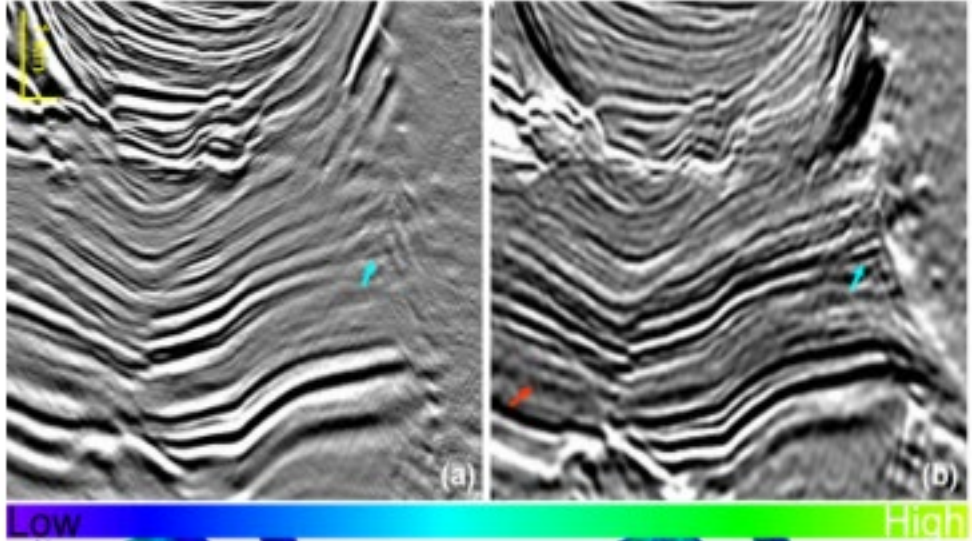
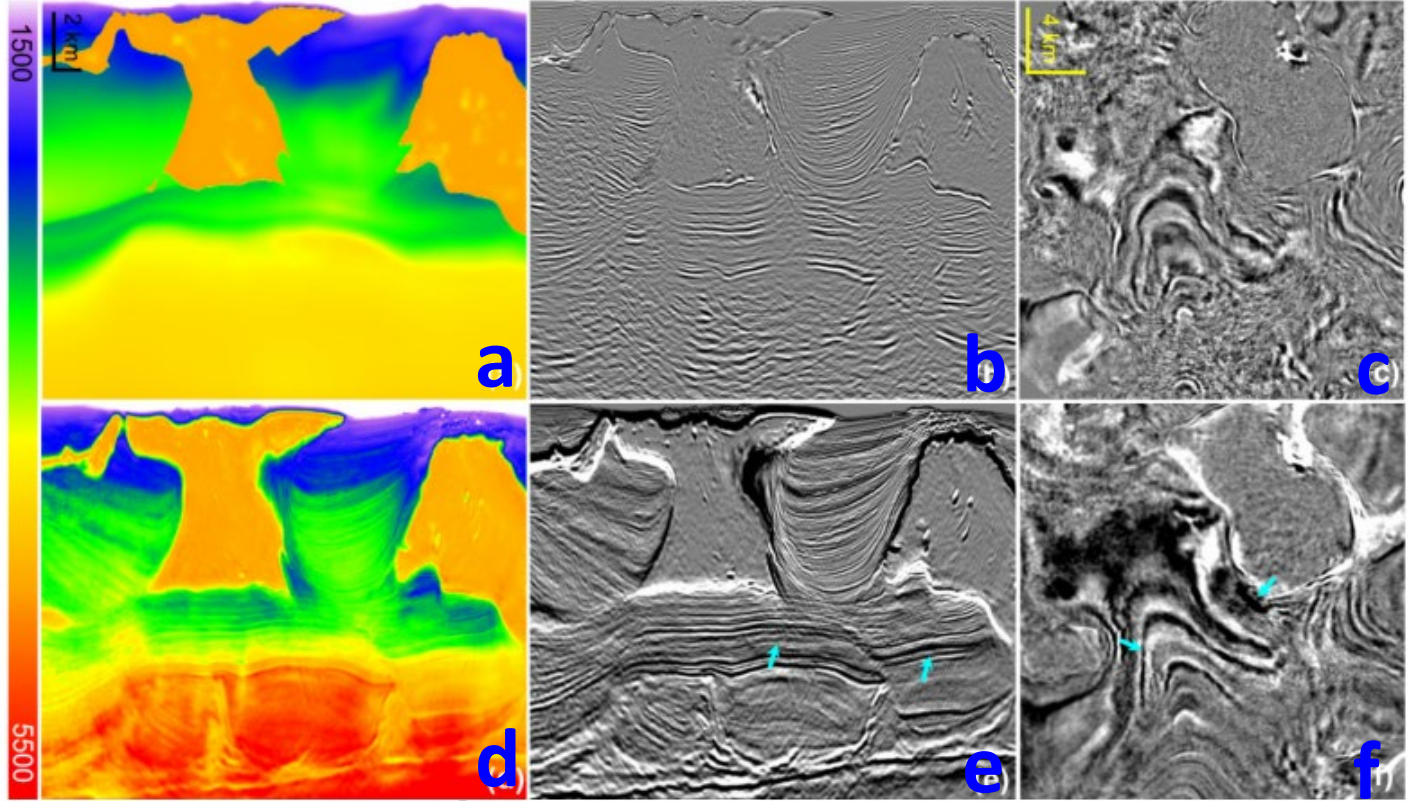
◆五、定量地震波成像的真正障碍及解

◆与当前国际上几种典型思想的对比

Solving subsalt imaging challenges in Green Canyon using OBN and FWI Imaging
 Jianlei Liu*, Min Yang, Jacob Deeds (Chevron); Joel Luckow (Total E&P USA, INC); Thomas Cheriyan, Pierre-Olivier Ariston (Total E&P Americas); Zhuocheng Yang, Meisen Mei, Zhigang Zhang (CGG)



核心思想无非是迭代过程中分开“层析响应”和“偏移响应”



线性化的LS-RTM (左) 与无线性化的FWI_Imaging (右) 成像结果对比

常规速度场、RTM结果和9Km深度切片 (a,b,c) 与15HzFWI速度、15Hz FWI_Imaging和9Km深度切片 (d,e,f) 的对比

CGG公司提出的TL-FWI+FWI_Imaging的思想与方法



◆五、定量地震波成像的真正障碍及解决方案

◆我们提出的特征波成像“CWI”+信息融合宽带波阻抗重构（建模）

“WBIM”不存在理论上的矛盾，而且比较实用化。能较好地解决我国陆上深层超深层高精度成像问题。

◆但是，很多技术环节需要优化。

◆1、背景速度建模

◆初至走时检测+波动理论走时层析

◆特征反射结构导引下的特征反射波FWI

◆2、多信息综合密度建模

◆3、无旁瓣或弱旁瓣定量反射系数估计

◆五、定量地震波成像的真正障碍及解决方案

◆当务之急要改进的方法技术：

◆复杂地表情况下的初始走时检测

- ◆重点是3D炮集下，“好属性”的提取
- ◆很多具体环节也需要优化

◆特征反射结构导引下的特征反射波FWI

◆探寻新的实现路线

- ◆1、FWI迭代中，分离“反射波层析响应”和“高波数扰动响应”
- ◆2、分别对两种响应进行各种正则化处理
 - ◆特征反射层的引入
 - ◆逐步加入地震相约束
 - ◆加入特殊地质体的约束
 - ◆来自井信息的约束

如何高效地分离？

◆五、定量地震波成像的真正障碍及解决方案

◆当务之急要改进的方法技术：

◆无旁瓣或弱旁瓣定量反射系数估计

◆问题的本质：三维PSF模糊了真反射系数情形下的反褶积问题。

◆超级分辨率盲反褶积或半盲反褶积

◆直接求反褶积算子？

◆目前的基本路线：提一个合理的约束优化反问题。

◆这应该是正确的做法。

◆新的做法：

◆FWI迭代中，分离出“反射波层析响应”和“高波数扰动响应”

◆对“高波数扰动响应”进行高维约束反褶积。如何做？



◆五、定量地震波成像的真正障碍及解决方案

◆当务之急要改进的方法技术：

◆无旁瓣或弱旁瓣定量反射系数估计

◆通过测井信息标定，实现反射系数估计结果的定量化，应该是不可能避免的。

◆定量化标定的核心理念：

◆对特征反射层首先进行深度位置标定；然后进行量级标定。

◆不追求非特征反射层的标定。

目录

- ◆ 一、概述
- ◆ 二、双复杂及深层超深层成像问题的解决方案
- ◆ 三、预处理方面的问题及可能的解决方案
- ◆ 四、弱信号的本质及弱扰动成像问题
- ◆ 五、定量地震波成像的真正障碍及解决方案
- ◆ 六、层间多次波引起的问题及解决方案
- ◆ 七、总结与讨论



◆六、层间多次波引起的问题及解决方案

- ◆多次波预测与成像成像，尤其是层间多次波预测与成像成像，从学术研究的角度，这是一个很好的、也是很难的研究议题。
- ◆一次波（线性化后对应的波传播结果）成像的研究逐渐在成熟。多次波成像要提上日程。
- ◆自由表面多次波成像，因为自由表面是一个特征反射面，它引起的多次波成像问题已经有比较有效的解决方案。
 - ◆SRME
 - ◆一次波与自由表面多次波联合成像
- ◆陆上油气地震勘探中，多次波成像处理的重点一定是**层间多次波**。
- ◆层间多次波成像还能用（或还能照搬）migration的做法吗？多次波成像看起来一定要用反演的方法。



◆六、层间多次波引起的问题及解决方案

◆**比较简单的情形：层间多次波是波在一定层厚、一定层速度组合的地层中产生的。**

◆**预测层间多次波一定要基于一定层厚、一定层速度组合的地层模型。据此，层间多次波预测问题一定要是一个反问题。地层参数估计准了，多次波也就预测准了，压制或成像就都可以了。地层参数估计准了，层间多次波也不用预测了！**

◆**层间多次波预测=地层参数估计！这才是问题的本质！**

◆**对于深层超深层油气勘探，层间多次波压制或成像会是一个核心问题。必须要引起充分的重视。**

再次强调：一定要提一个针对特征反射层模型的反问题，才能真正解决层间多次波预测与成像问题。

目录

- ◆一、概述
- ◆二、双复杂及深层超深层成像问题的解决方案
- ◆三、预处理方面的问题及可能的解决方案
- ◆四、弱信号的本质及弱扰动成像问题
- ◆五、定量地震波成像的真正障碍及解决方案
- ◆六、层间多次波引起的问题及解决方案
- ◆七、总结与讨论

◆七、总结与讨论

- ◆油气勘探走向“双复杂”、超深层、海相碳酸盐岩油藏、非常规岩性油藏，地震波成像及对应的处理方法也要改变。
- ◆事实上，提出针对岩性油藏的、定量的地震波成像的概念后，很多老的成像处理观念都已经不适用了。
- ◆事实上，当前很多领域中的“成像”都是定性的。定量的成像是“成像”概念的巨大跃升。
- ◆基于Bayes参数估计的数学算法（FWI）并不能解决定量的地震波成像问题，尤其是宽带的参数估计。 **基于人工神经网络DL算法是一个选项吗？**

◆七、总结与讨论

- ◆地震波成像永远会是一个“信息不足”的参数估计问题。无论如何采集地震数据，随着成像精度要求的提高，总是信息不足，不能得到满足预期精度要求的反演解。因此，充分地表达额外信息，充分地利用额外信息，对于提高反演成像精度必不可少。
- ◆油气勘探的目标在哪里，我们的成像技术发展也要指向哪里。
- ◆至于如何发展，WPI当前的认识只是当前思考的结果。还要不断地深化与修正。



谢谢
欢迎批评指正