



波现象与智能反演成像研究组

从针对储层的、 定量的地震波成像到定量的 储层描述

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10月12日

目录

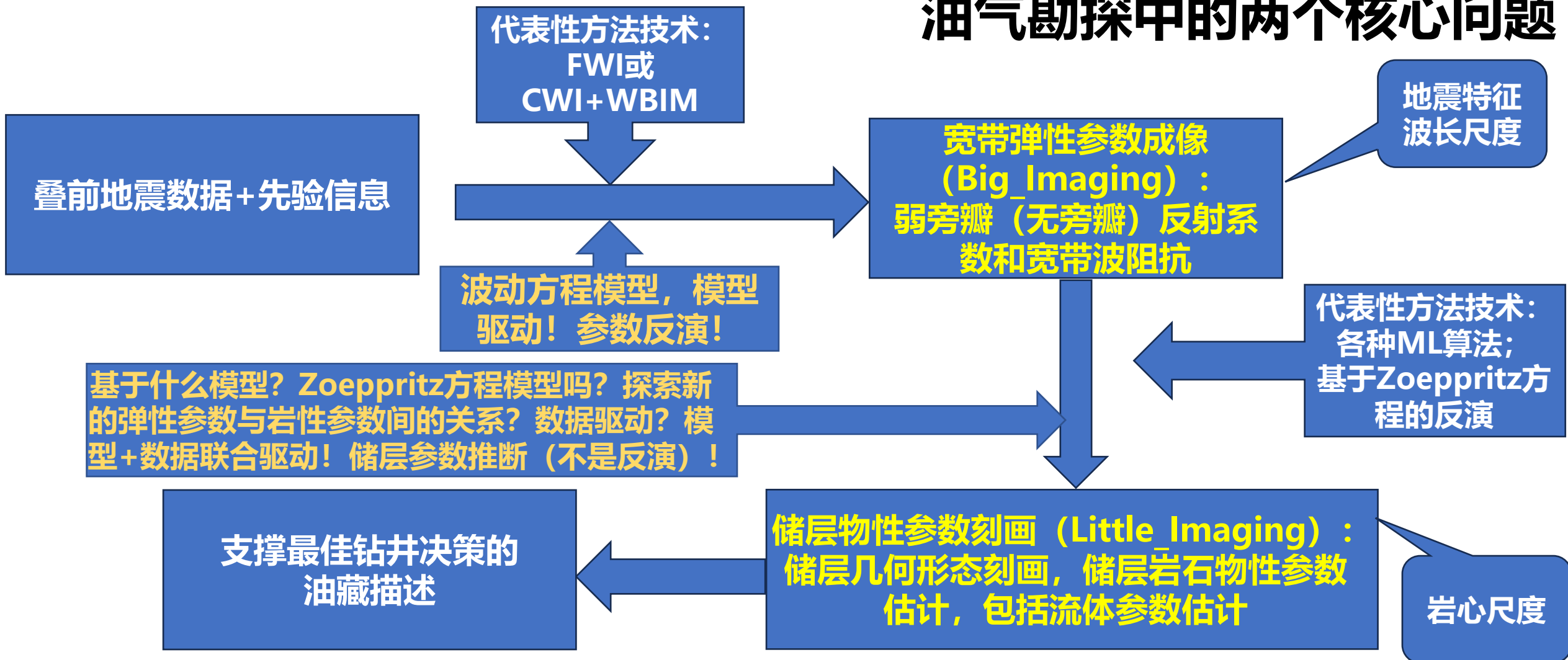
- ◆一、油气藏描述的本质
- ◆二、油气藏描述对地震波成像的需求
- ◆三、从针对储层的、定量的地震波成像到定量的储层描述
- ◆四、结论与讨论

一、油气藏描述的本质

- ◆ “双复杂” + 深层超深层油气藏；岩性油气藏；非常规油气藏已成为重要的勘探目标。
- ◆ 油气地震勘探最终目的：
 - ◆ 精确地描述油气藏，进行准确的含油气性分析，做出最佳的钻井决策，得到最高的油气勘探效益。
- ◆ 油气地震勘探核心问题：
 - ◆ 由叠前地震数据及其它相关的先验信息，进行宽波数带的弹性参数估计（或称广义的高精度地震波成像），与岩石物理知识结合，进行精确的油气藏描述和准确的含油气性评价。

一、油气藏描述的本质

油气勘探中的两个核心问题



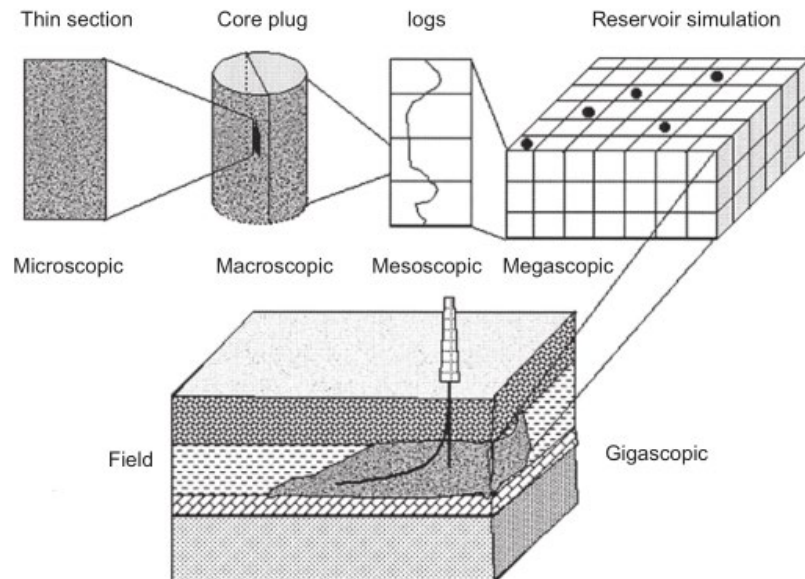
一、油气藏描述的本质

◆ **油气藏的产生**：含有机质的原岩，在温压作用下，形成干酪根，进而形成油气，经过一次（甚至二次）运移，封盖在含孔隙/裂隙岩石中，形成油气藏。

◆ **地质过程控制了油气藏的生成。**

◆ **油气藏大致可分为**：构造油气藏、构造控制下的岩性油气藏、岩性油气藏。

◆ **油气藏本身的多尺度特性**：



◆ **薄片**：纳米、微米、毫米、厘米

◆ X光、质谱仪、扫描电镜等直接观察，定性描述

◆ **岩心**：若干厘米，十几厘米

◆ 温压作用下，力学及流体机制直接测量，定量测量，定性描述

◆ **测井**：若干厘米、十几厘米

◆ 井下原位测量岩石地球物理响应，定量测量

◆ **地震**：米、十几米、几十米甚至百米

◆ 地震波在波长尺度上感知岩石物性变化，定量测量

◆ **盆地**：千米、数十千米

◆ 油藏动态模拟

一、油气藏描述的本质

◆不尺度下，感知油气藏岩石介质物性变化的方式：

◆实验室直接测量：定性描述

◆薄片（碎屑）：扫描电镜、质谱仪等

◆岩心：X光、核磁共振仪（MRI）等

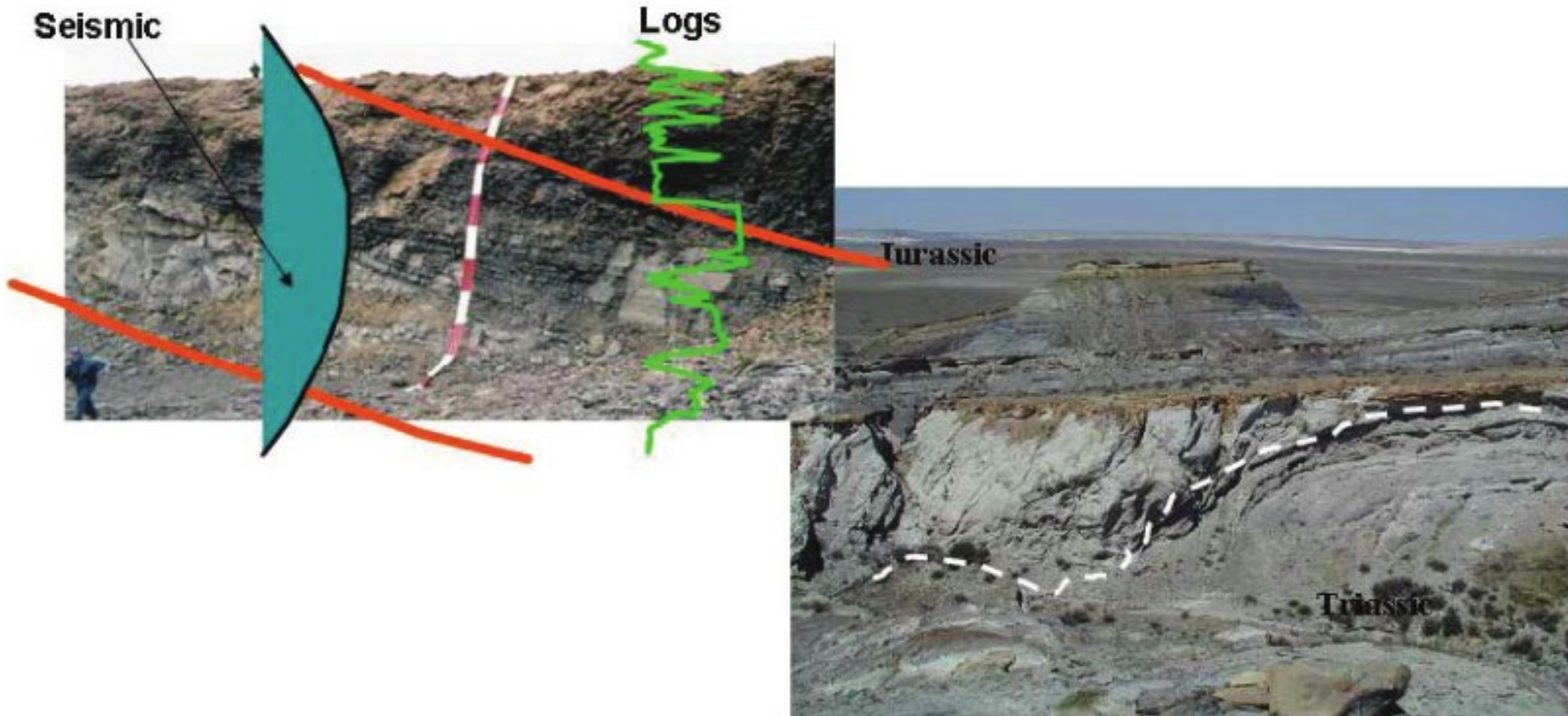
◆测井原位测量：定量测量

◆高频电磁波和高频声波测量

◆特征波长尺度地震波感知岩石物性介质变化

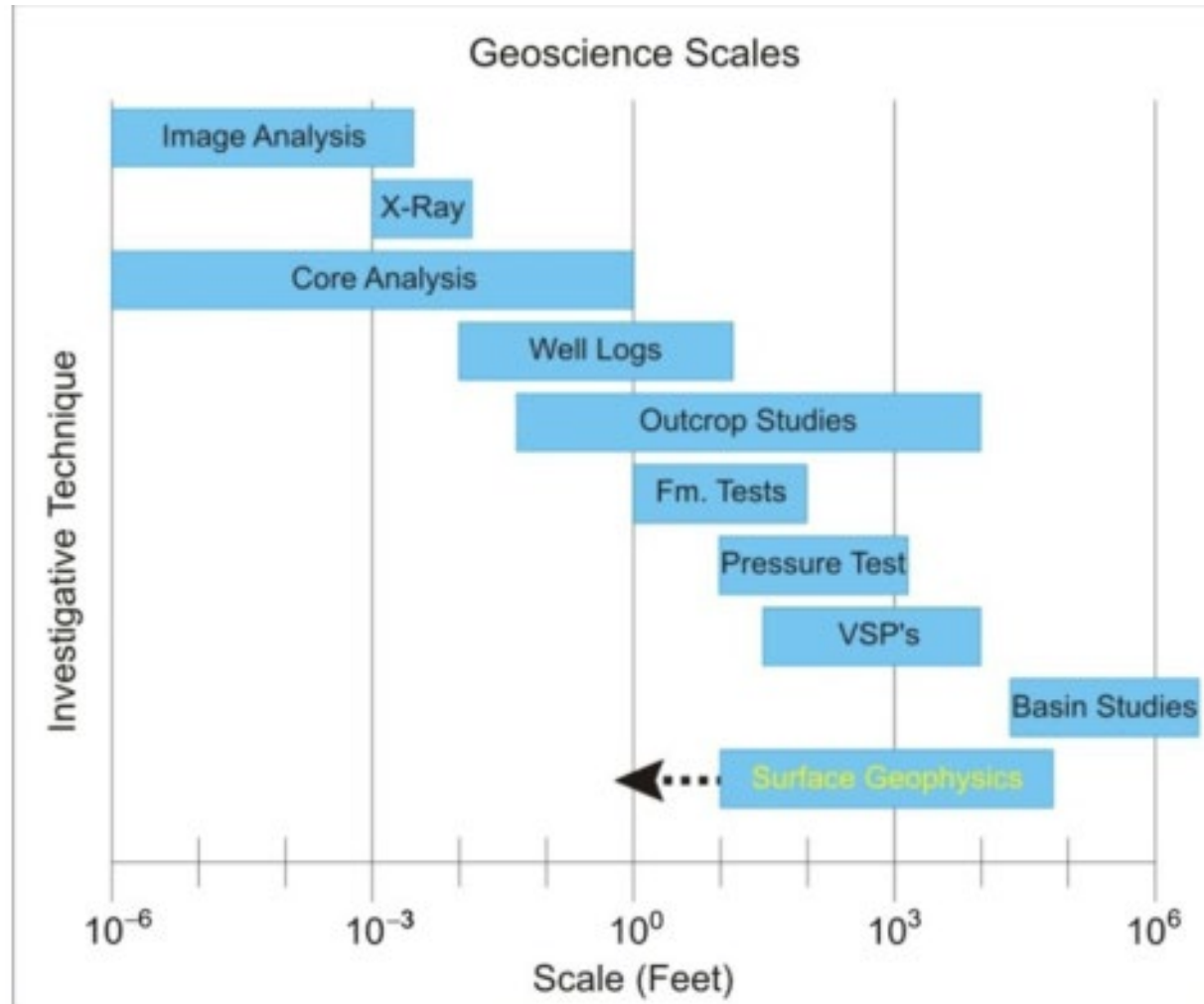
◆地震波偏移成像与地震波反演成像

一、油气藏描述的本质



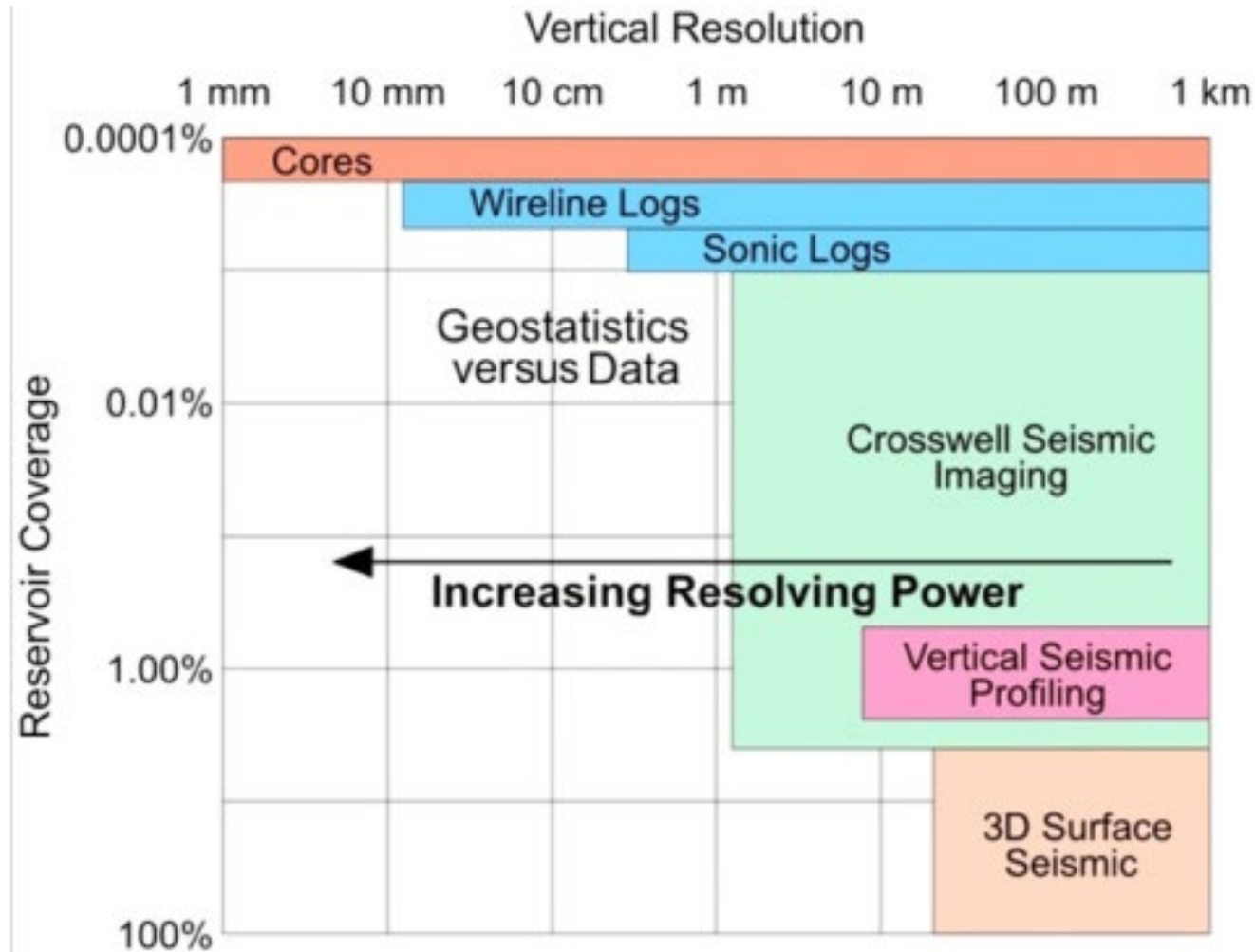
地震勘探中，尺度的示意图。Interpretation of 3D Seismic Data (7th Edition) A. R. Brown

一、油气藏描述的本质



油气地震勘探中的分辨率问题。 Stratigraphic Reservoir Characterization for Petroleum Geologists Geophysicists, and Engineers. (2th Edition) R. M. Slatt

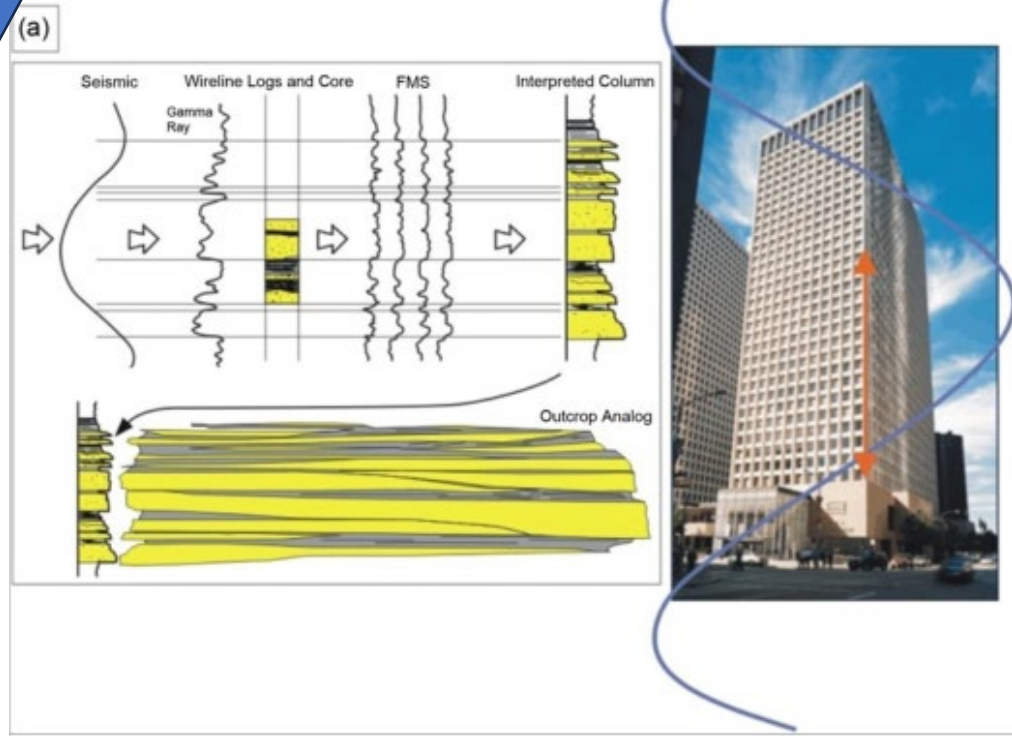
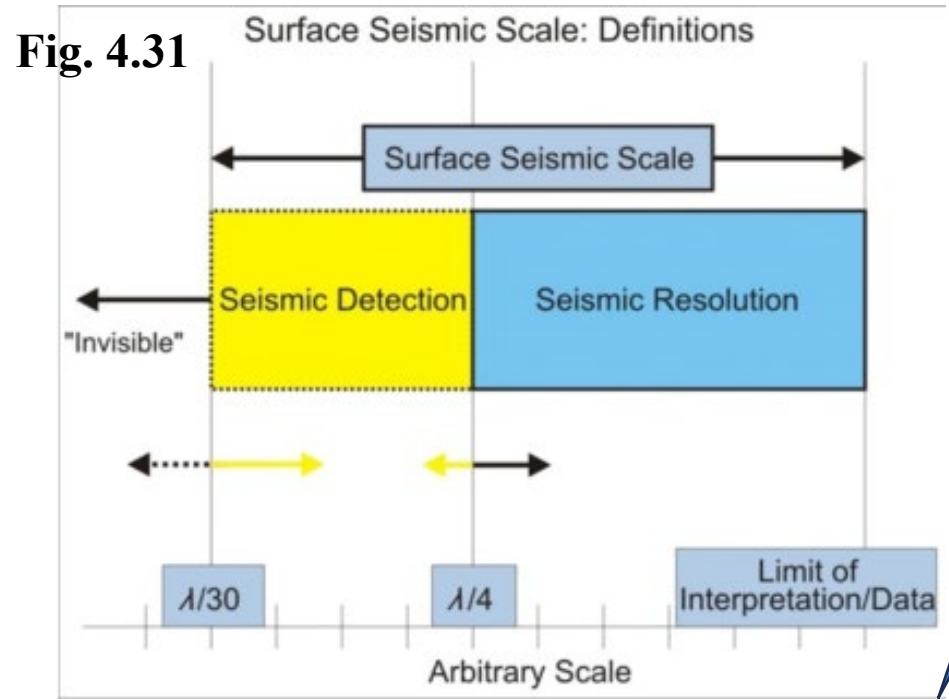
一、油气藏描述的本质



油气地震勘探中的分辨率问题。 Stratigraphic Reservoir Characterization for Petroleum Geologists Geophysicists, and Engineers. (2th Edition) R. M. Slatt

一、油气藏描述的本质

Detection如何做到提高分辨率的？提取属性+测井？哪些属性参数？



Resolution is the ability of a seismic wave to identify and image both the top and base of a layer, and it usually is considered to be 1/4 the thickness of the seismic wavelength (Fig. 4.31). Detection is the ability of a seismic wave to “feel” and “respond” to a layer, even though the layer boundaries cannot be imaged (Fig. 4.31). The detection limit is considered to be 1/30 the thickness of the wavelength.

油气地震勘探中的分辨率问题。 Stratigraphic Reservoir Characterization for Petroleum Geologists Geophysicists, and Engineers. (2th Edition) R. M. Slatt

岩石物理学是跨尺度精确油藏描述的关键基础。

一、油气藏描述的本质

◆对岩石物理学的认识：

◆**岩石物理学**：描述空隙岩石的物理性质（力学性质、电学性质等），不同流体与岩石空隙表面的相互作用及空隙介质内空隙大小分布的学科。

◆岩石物理学的三个子类：

◆**开发岩石物理学；地震岩石物理学；测井岩石物理学**

◆**开发岩石物理学**：针对提高采收率的岩石物理学，注重岩石的渗流性质和岩石储集空间中的流体性质。

◆**地震岩石物理学**：针对地层精细勘探的岩石物理学，注重研究岩石及含不同流体时岩石的力学性质、声学性质、弹性性质。

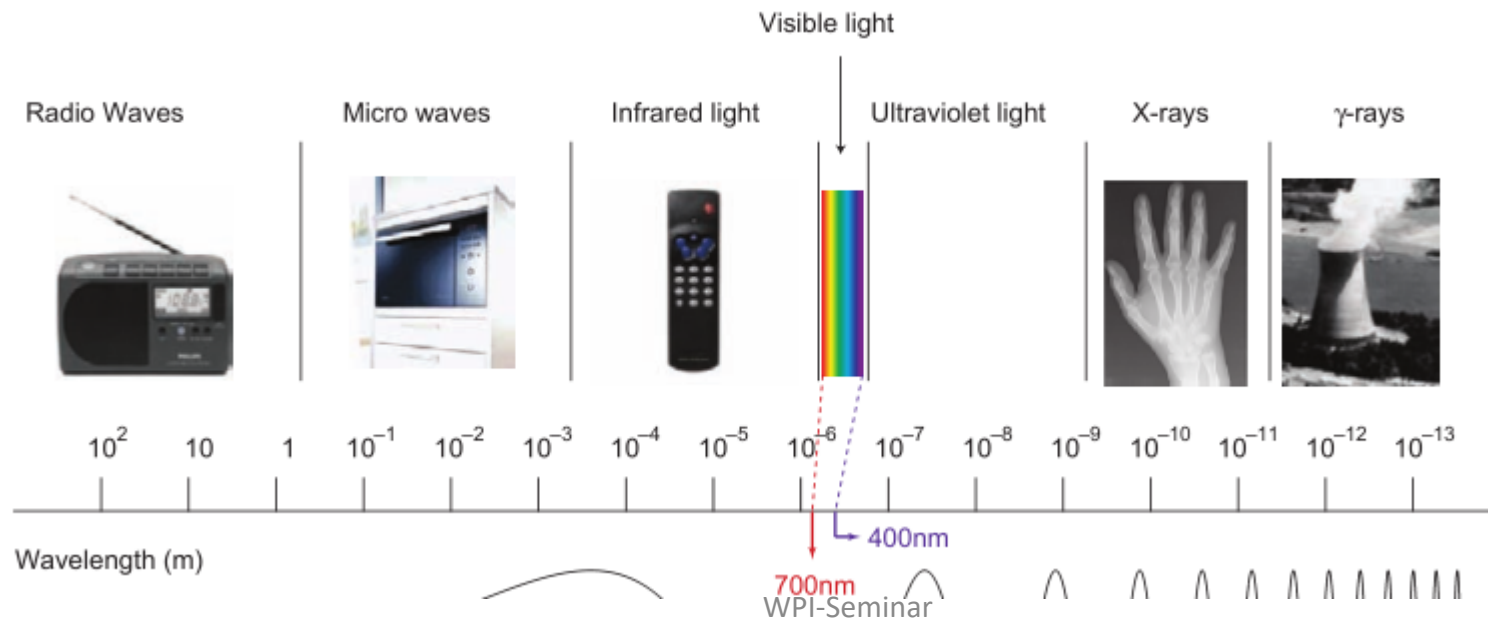
◆**测井岩石物理学**：既研究岩石的渗流和声学/弹性特征，也研究岩石的电/磁、光学、核物理、核磁共振响应机制，试图构建物理测量信息（数据）到岩石固有特征参数之间的关系。

一、油气藏描述的本质

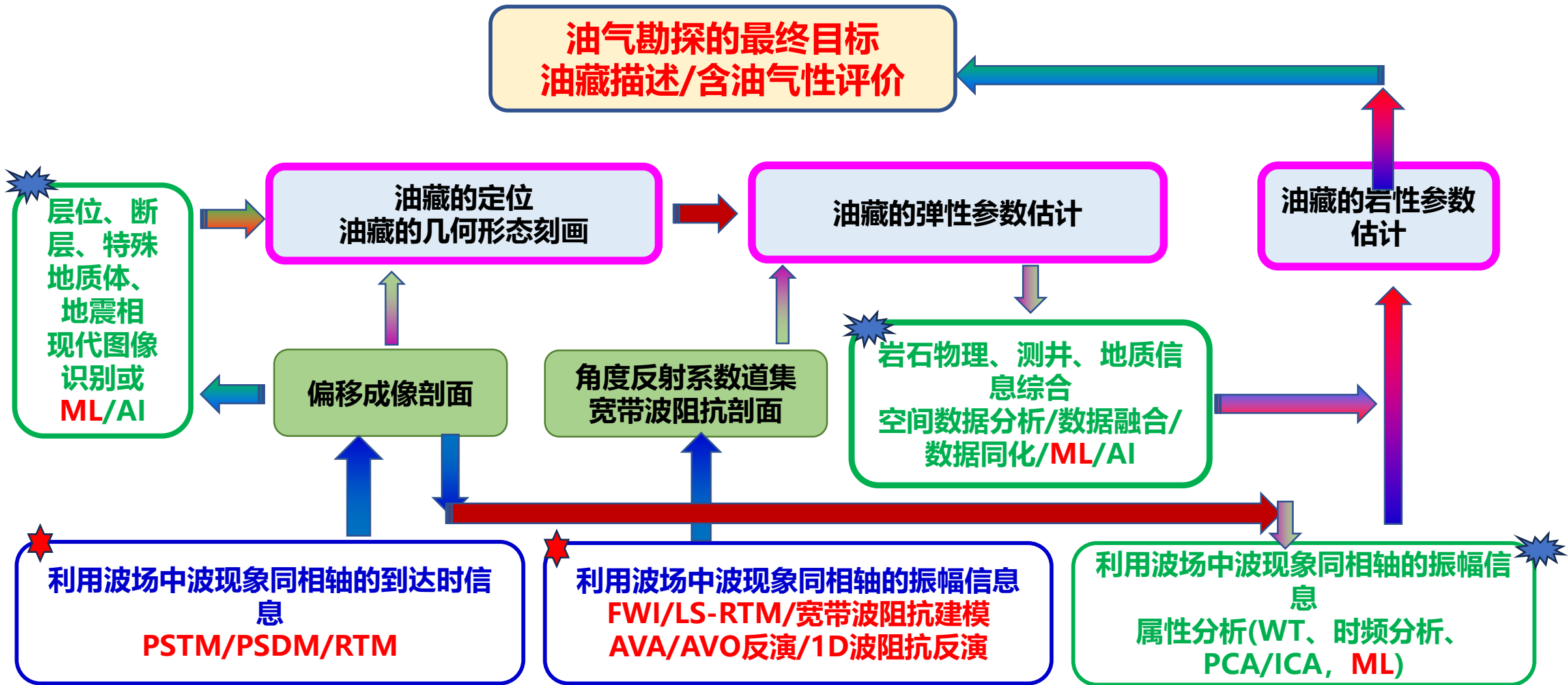
◆ 油气地震勘探中，特征波长的地震波感知油气藏岩石物性变化：

◆ 不同频率的地震波感知的油气藏岩石物性变化的尺度是不同的。一般地，用地震子波优势频率的波长（特征波长）界定地震波感知油气藏岩石物性变化的尺度，即若干米、十几米、几十米级这样的尺度。

◆ 电磁波在感知物性参数变化、通讯、视觉、医学成像、无损探伤等中的波长分布情况



一、油气藏描述的本质



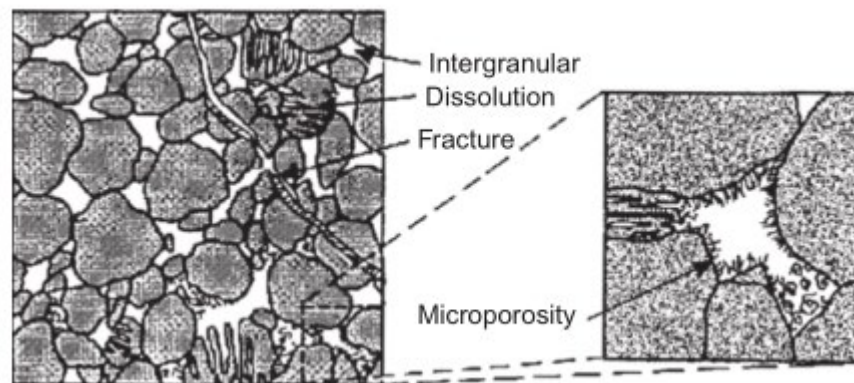
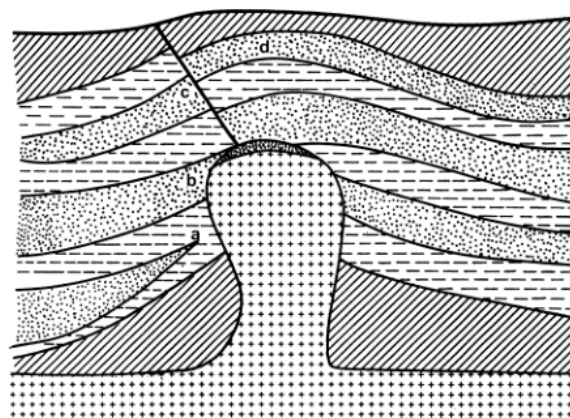
油气地震勘探中油藏描述的基本逻辑路线及对应的关键技术

一、油气藏描述的本质

◆油藏描述的合理目标:

- ◆ 勘探地震波波长尺度上, 油藏描述的合理目标:
 - ◆ 数米到数十米尺度上, 油藏的几何形态变化、在平均与等效的意义下, 进行油藏岩性变化的定性刻画。
 - ◆ 这是勘探层次上的油藏描述问题。

- ◆ 在岩心尺度上, 油藏描述的合理目标:
 - ◆ 毫米、厘米、分米尺度上的岩性变化。
 - ◆ 可以刻画孔隙度、渗透率、流体性质。
 - ◆ 这是开发层次上的油藏描述问题。



勘探层次上的油藏描述可以借助测井信息过渡到开发层次上的油藏描述吗?

一、油气藏描述的本质

◆ 勘探层次（尺度）上的油藏描述问题被归结为：

- ◆ 信息提取+信息综合+最佳判决

◆ 油藏描述的主要信息源：

- ◆ “两宽一高”地震数据的广义地震波成像（弱旁瓣反射系数+宽带阻抗）+ 井数据

- ◆ 岩石物理学知识 + 油气地质学知识

◆ 油藏描述问题被提成：

- ◆ 一个基于信息综合的最佳决策问题。

- ◆ 数学上，Bayes最佳决策问题。

- ◆ 对应地，“两宽一高”地震数据广义地震波成像问题被提成：

- ◆ 数学上，Bayes参数估计问题。

- ◆ 事实上，FWI是Bayes参数估计理论在勘探地震中的一个应用实例。



一、油气藏描述的本质

◆对“两宽一高”地震数据广义地震波成像（弱旁瓣反射系数+宽带阻抗）问题的评价：

- ◆被认为是基于因果关系的科学问题。
- ◆波动方程建立起了弹性参数（ V_p , V_s , 密度；反射系数；波阻抗等）与（实测）波场之间的因果关系。
- ◆基于此因果关系和Bayes参数估计理论，产生了地震波反演成像方法技术。
- ◆目前，各种层次的、各种变种的地震波成像处理方法基本上都包容在此理论框架下。

一、油气藏描述的本质

- ◆ **对勘探层次（尺度）上的油藏描述问题的评价：**
 - ◆ **不存在类似波动方程的正问题，描述储层物性参数（譬如孔隙度、渗透率、饱和度、裂缝密度与方位、岩石脆性、含油气性等等）与（实测）波场之间的因果关系。**
 - ◆ **用储层描述、或储层刻画、或储层评价，而不是储层反演的名字，已经说明了储层描述问题不可能有像地震波反演成像问题的解决途径。**
 - ◆ **储层描述问题是一个基于信息综合的最佳决策问题。**
 - ◆ **储层描述问题的核心是各种信息的提取。**
 - ◆ **储层描述的关键信息是由广义地震波成像技术提供的宽带弹性参数（弱旁瓣反射系数+宽带阻抗）成像结果。测井信息是储层描述的另一个关键信息。**

一、油气藏描述的本质

◆对勘探层次（尺度）上的油藏描述问题的评价：

◆正是因为不存在类似波动方程的正问题，描述储层物性参数（譬如孔隙度、渗透率、饱和度、岩石脆性、含油气性等等）与（实测）波场之间的因果关系，储层描述问题不是一个纯科学问题。

◆科学问题的典型特征是：物理上存在一个可检验的因果关系。它通常是用偏微分方程描述的。

◆储层描述问题是个典型的基于数据驱动方法解决的问题

◆ML/AI算法提取信息+达到最佳目标的空间信息融合+最佳决策是解决储层描述问题的核心技术。

目录

- ◆一、油气藏描述的本质
- ◆二、油气藏描述对地震波成像的需求
- ◆三、从针对储层的、定量的地震波成像到定量的储层描述
- ◆四、结论与讨论

二、油气藏描述对地震波成像的需求

◆ 勘探层次（尺度）上油气储层描述的基本信息源：

◆ 1 “两宽一高” 叠前地震数据 → 广义的地震波成像结果（弱旁瓣（无旁瓣）反射系数和宽带波阻抗）

◆ 定量的

◆ 时空关系规定的

◆ 2 测井、岩芯、录井结果

◆ 定量的或半定量的

◆ 时空关系规定的

◆ 3 油气地质学知识

◆ 定性的

◆ 非时空关系规定的

◆ 4 岩石物理学知识

1和2 提供了油藏描述的主要信息量。

二、油气藏描述对地震波成像的需求

◆ 勘探层次（尺度）上油气储层描述的信息提取：

◆ 1、探区构造、沉积、油气地质总体情况判断相关信息的提取

◆ 方法技术：保真与高分辨率的叠前深度偏移技术

◆ 2、与储层和储集体几何形态描述相关信息的提取

◆ 方法技术：地震波叠前深度偏移成像技术；图像的相干增强技术；图像识别技术

◆ 3、与储层的岩性参数描述相关信息的提取

◆ 方法技术：

◆ 1D 波阻抗反演技术；

◆ 特征波反演成像（CWI）+ 宽带波阻抗建模技术（WBIM）；

◆ 背景速度场、背景密度场、宽带反射系数成像

◆ AVA叠前反演技术；

◆ 岩石物理关系分析技术。

二、油气藏描述对地震波成像的需求

◆ 勘探层次（尺度）上油气储层描述的信息提取：

◆ 4、方位角度成像道集中与储层相关的信息提取

◆ 方法技术：感知方位角度道集中同相轴上成像子波的形态变化（振幅、相位）与储层岩性变化关系的技术

◆ 裂缝系统几何的（半）定量描述

◆ 5、成像叠加剖面中与储层相关的信息提取

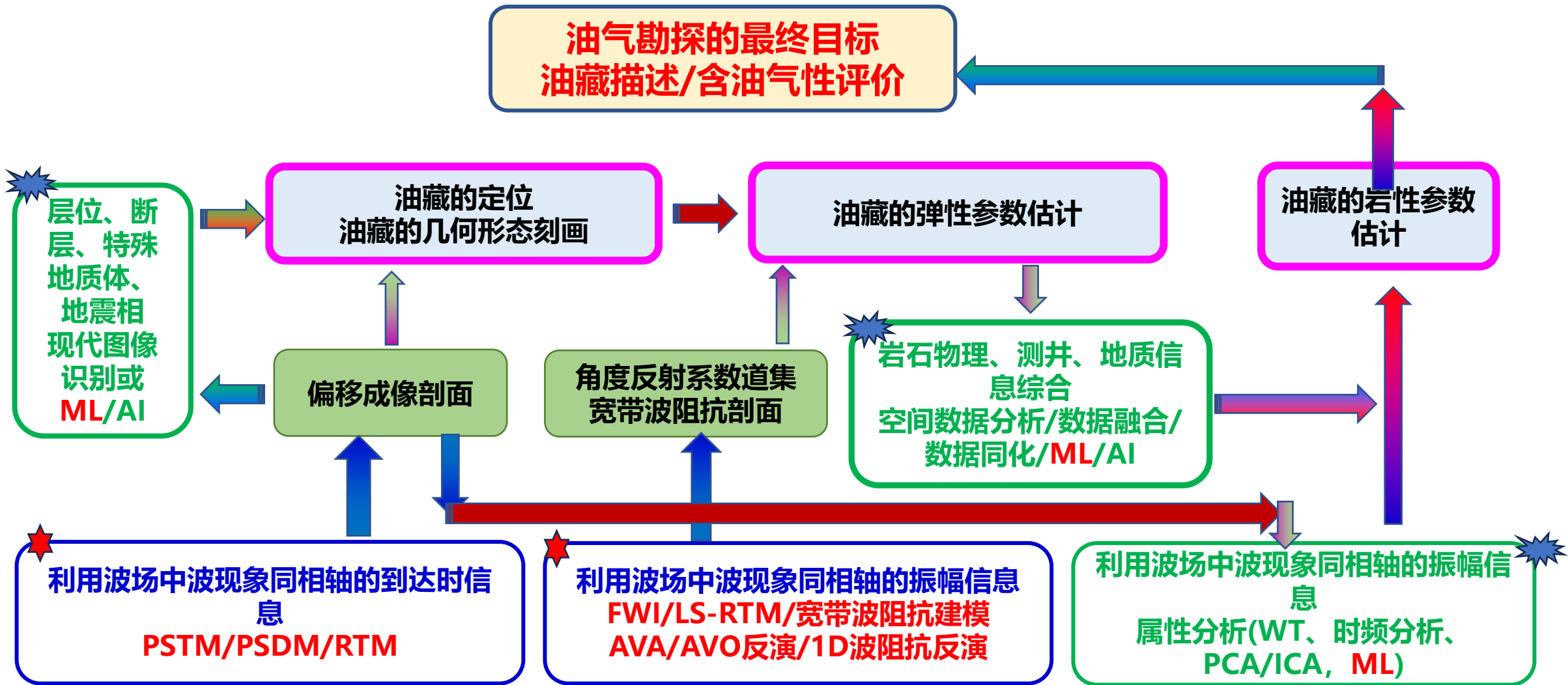
◆ 方法技术：感知成像叠加剖面中同相轴上成像子波的形态变化（振幅、相位）与储层岩性变化关系的技术

◆ 通过属性提取和分析定性描述储层

◆ 6、与储层流体相关的信息提取

◆ 方法技术：只能通过岩石物理学的桥梁建立弹性参数与岩性参数和流体参数之间的关系

二、油气藏描述对地震波成像的需求



油气地震勘探中油藏描述的基本逻辑路线及对应的关键技术

二、油气藏描述对地震波成像的需求

◆SS 1.6

◆ **Seismic imaging and inversion: What are we doing, how are we doing, and where are we going? *Samuel H. Gray, CGG***

- ◆ **首先依然是地震波采集问题。地震数据采集的技术方向是最佳地采集到最佳照明全面的波场信息。**
 - ◆ **炮检对等采样**
 - ◆ **无假频的高密度采样**
 - ◆ **全（宽）方位、全（宽）频带采样**
- ◆ **这是地震成像的数据基础，十几年来业界已经达成共识！**

二、油气藏描述对地震波成像的需求

◆SS 1.6

◆ **Seismic imaging and inversion: What are we doing, how are we doing, and where are we going? *Samuel H. Gray, CGG***

◆ **然后，提出Big Imaging和Little Imaging的说法。**

◆ **Because this part of seismic processing tends to focus on **large-scale geologic features** below complex overburdens using **large datasets**, it can be called “**big imaging / inversion**”.**

◆ **Because this part of seismic processing tends to focus on **fine-scale details of oil and gas reservoirs**, usually using **smaller datasets**, it can be called “**little imaging / inversion**”**

二、油气藏描述对地震波成像的需求

◆ SS 1.6

◆ **Seismic imaging and inversion: What are we doing, how are we doing, and where are we going? *Samuel H. Gray, CGG***

◆ **Big Imaging的常规含义及必然走向FWI:**

- ◆ Seismic imaging (migration) has historically been used to clarify **structural targets** and to remove diffraction noise from stratigraphic targets.
- ◆ Seismic inversion has taken many forms, including **single-trace inversion for impedance contrasts, inverting moveout or waveforms to obtain seismic velocity, and even analyzing amplitudes of unmigrated or migrated data to determine rock properties.**
- ◆ In the past, these processes were kept separate from one another.
- ◆ **In the present, they are being used more and more in combination. In an ideal future, they will be completely combined into a single process called FWI inversion.**

二、油气藏描述对地震波成像的需求

◆SS 1.6

◆Seismic imaging and inversion: What are we doing, how are we doing, and where are we going? *Samuel H. Gray, CGG*

◆当前Big Imaging的重点技术方向

- ◆ (高波数参数扰动的) 偏移成像:
 - ◆ 各向异性成像
 - ◆ Q成像
 - ◆ 包含自由地表多次波的成像, 海洋油气勘探
- ◆ (背景) 速度估计
 - ◆ 透射波FWI (低频+长偏移距)
 - ◆ High-Definition Tomography
 - ◆ 透射波FWI+反射波FWI

二、油气藏描述对地震波成像的需求

◆ SS 1.6

◆ **Seismic imaging and inversion: What are we doing, how are we doing, and where are we going? *Samuel H. Gray, CGG***

◆ **当前，Little Imaging的重点技术方向**

◆ **针对非常规储层，识别裂隙方位和密度是重点**

◆ **VVAZ: 速度随方位角的变化**

◆ **AVAZ: 振幅随方位角的变化**

◆ **完全没有提AVA反演，更没有什么叠前反演**

二、油气藏描述对地震波成像的需求

◆SS 1.6

◆Seismic imaging and inversion: What are we doing, how are we doing, and where are we going? *Samuel H. Gray, CGG*

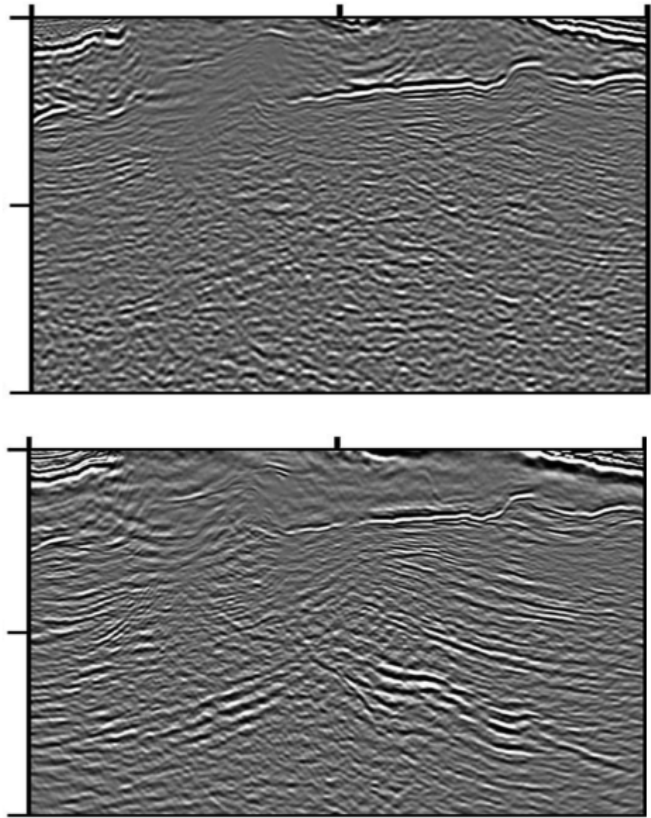


Figure 1. Top: Narrow-azimuth subsalt image. Bottom: Wide-azimuth subsalt image at the same location, showing greater image clarity. From Etgen et al. (2009).

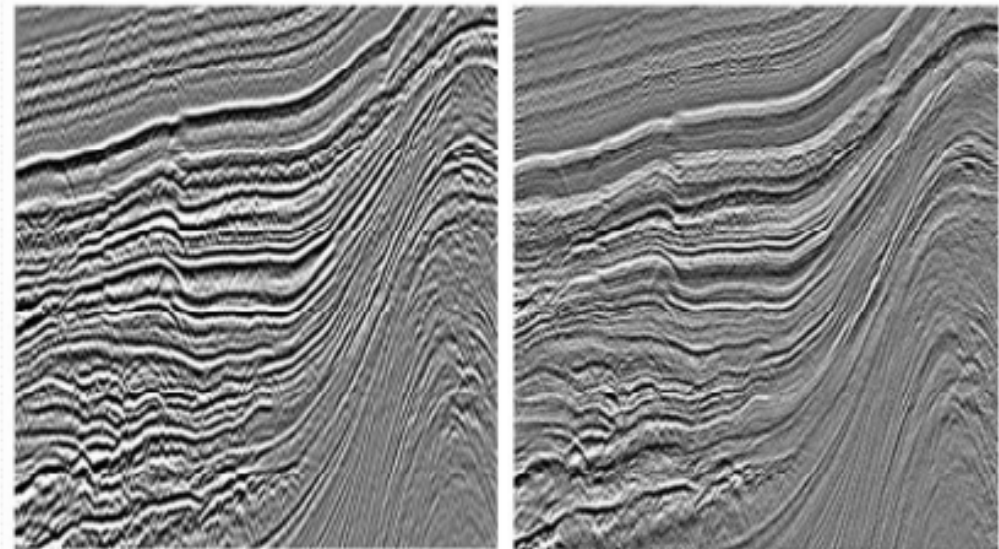


Figure 2. Left: Conventional narrow-band image. Right: Broadband image. (DownUnder Geosolutions)

二、油气藏描述对地震波成像的需求

◆SS 1.6

◆Seismic imaging and inversion: What are we doing, how are we doing, and where are we going? *Samuel H. Gray, CGG*

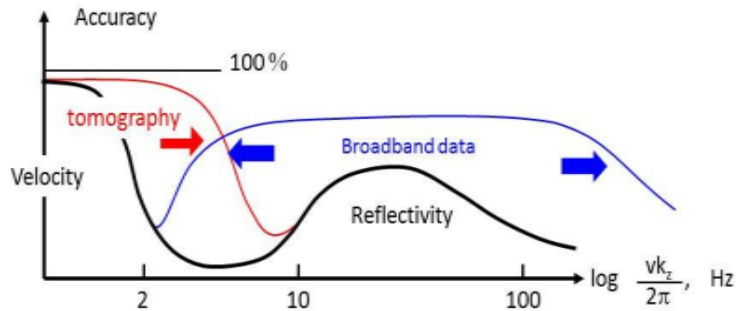


Figure 3: In black, the classic sketch by Claerbout (1985) illustrating the resolution we can expect from velocity analysis (“Velocity”) and imaging (“Reflectivity”). The gap between 2 Hz and 10 Hz is now filled by the improved resolution provided by high-resolution tomography and FWI (red) and the impact of broadband acquisition on imaging (blue). From Lambare et al. (2014).

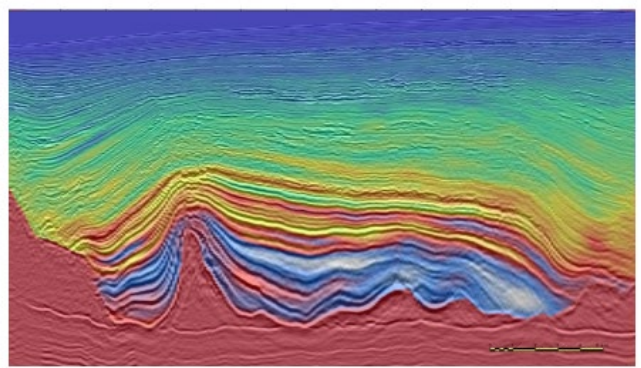


Figure 4: Velocity model from high-resolution tomography superimposed on a depth migrated stack From Sioni et al. (2012).

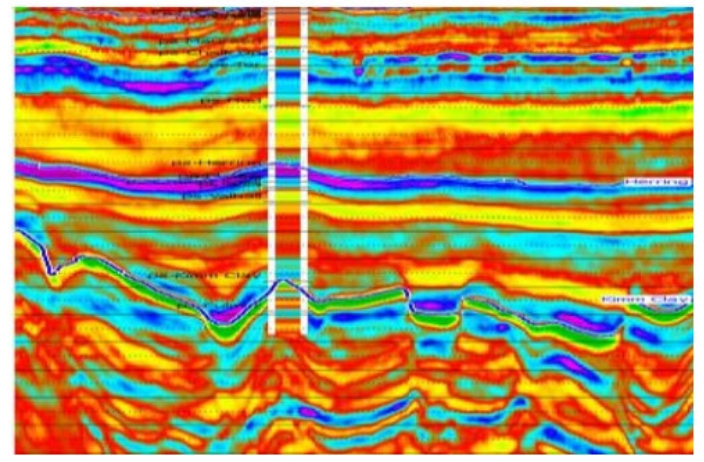


Figure 5: Colored inversion of impedance perturbation obtained from RTM of North Sea data. From Zhang et al. (2013).

二、油气藏描述对地震波成像的需求

◆SS 1.6

◆Seismic imaging and inversion: What are we doing, how are we doing, and where are we going? *Samuel H. Gray, CGG*

◆地震波成像向何处去?

◆seismic images will be replaced with earth models including structure, velocity, and attenuation.

◆本质上, 或根本理论上, 就是做好FWI

◆Big imaging / inversion is **on schedule** to be inversion within a decade.

◆Little Imaging / inversion applied to unconventional reservoir is **not on schedule**.

二、油气藏描述对地震波成像的需求

◆ SS 1.6

◆ **Seismic imaging and inversion: What are we doing, how are we doing, and where are we going? *Samuel H. Gray, CGG***

◆ ***Samuel H. Gray*核心观点:**

◆ **以FWI+LS_RTM为代表的Big Imaging是地震波成像的核心，今后一段时间是地震波反演成像的核心。**

◆ **FWI理论下，估计定量的、宽带的弹性参数估计是确定性的技术发展方向。**

◆ **针对储层的Little Imaging，在等效介质的意义下，做VVAz和AVAz分析获得裂隙储层的主方位是可行的。**

◆ **但是，如果在精细的储层尺度上做反演，波在复杂储层中的物理机制都不知道，目前无法进行储层尺度上的反演成像。**

◆ **Little Imaging到底该怎么做呢？**



二、油气藏描述对地震波成像的需求

◆ 综合性结论:

◆ 勘探地震波波长尺度上，油藏描述的合理目标:

◆ 数米到数十米尺度上，油藏的几何形态变化、在平均与等效的意义下，进行油藏岩性变化的定性刻画。

◆ 解决勘探层次上的油藏描述问题。

◆ 问题是解决这个层次上的油藏描述问题的合理策略和方法技术应该是
什么样的?

◆ 地震波成像目标的合理定位:

◆ 保真、定量的弱旁瓣（或无旁瓣）方位角度反射系数成像

◆ 宽带波阻抗成像

◆ 最好有PP波宽带波阻抗成像结果和SS波宽带波阻抗成像结果。

目录

- ◆一、油气藏描述的本质
- ◆二、油气藏描述对地震波成像的需求
- ◆三、从针对储层的、定量的地震波成像到定量的储层描述
- ◆四、结论与讨论

三、从针对储层的、定量的地震波成像到定量的储层描述

◆ 储层岩石物性的多尺度特征及描述方式的多尺度特征：

- ◆ 地下岩石物性，本质上，是空变的、多尺度的。

- ◆ 描述岩石物性的手段也是分尺度的。

- ◆ 主要包括三个层次：

- ◆ 薄片尺度上的、用仪器直接观测的、定性的描述方式；

- ◆ 岩心尺度上的、实验室测量的、（半）定量的描述方式；岩心尺度上的、原位井中测量的、（半）定量的感知储层岩石物性变化的方式（地球物理测井）；

- ◆ 地震特征波长尺度上的、野外实测地震波场及地震波反演成像（Zoeppritz方程AVA反演是特殊情形）、（半）定量的感知储层岩石物性变化的方式。

- ◆ 这是三种测量或感知储层岩石物性（变化）的方式

- ◆ 岩石物性参数描述问题的本质：

- ◆ 基于信息的（统计）推断，而不是基于观测波场和特点因果关系的反演。

三、从针对储层的、定量的地震波成像到定量的储层描述

◆ 储层岩石物性的多尺度特征及描述方式的多尺度特征：

◆ 岩石物性参数描述的基本方式：

◆ 数据驱动的方式

◆ 模型驱动的方式

◆ 缺乏合适的正问题表达式，即弹性参数与岩石物性参数之间的因果关系式

◆ 岩石物性参数描述的合理目标

◆ 在岩心/测井尺度上，（半）定量地进行储层岩性物性的描述。

◆ 问题是解决这个层次上的油藏描述问题的合理策略和方法技术应该是什么样的？

三、从针对储层的、定量的地震波成像到定量的储层描述

◆ 储层岩石物性的多尺度特征及描述方式的多尺度特征：

◆ 1、一个理想实验

- ◆ 假设两种不同的、均匀的岩石物性介质被水平地层分开。用地震勘探方法技术描述上述地层的岩石物性。
- ◆ 合理途径（应该）是：背景速度的估计 + 反射系数的估计 + 宽度波阻抗的估计 + 波阻抗与岩石物性关系 + 由宽带波阻抗转化为岩石物性参数
- ◆ 背景速度估计的精度受地震子波（频带+初相位）、观测系统、背景速度反演方法的影响。反射系数估计的精度受地震子波+反射系数反演方法的影响。
- ◆ 即便如此简单的介质情况，反射界面的位置、波阻抗的精度也是有限的。
 - ◆ 子波（频带、初相位）对成像精度的影响是最严重的。因此，用地震波子波的空间延续来感知地下介质岩石物性的变化，是地震勘探尺度的根本物理含义。用子波优势频率的波长代表勘探地震的尺度效应是合理的。

三、从针对储层的、定量的地震波成像到定量的储层描述

◆ 储层岩石物性的多尺度特征及描述方式的多尺度特征：

◆ 1、一个理想实验

- ◆ 在地震勘探的尺度上，地震波成像结果（Big_Imaging成像）是可信赖的。但精度也是有限的。
- ◆ 即便均匀的岩石物性介质，其弹性参数（譬如波阻抗）与岩石物性参数的关系可能是极为复杂的。各种各样的岩石骨架、孔隙和流体充填，可能对应相同或十分相近的弹性参数。即：弹性参数与岩石物性参数的关系可能是强非线性的。
- ◆ 弹性参数（譬如波阻抗）转化为岩石物性参数（Little_Imaging）也一定是高度非线性的。如果考虑到二者的尺度差异，这个转化过程的非线性性会更强。
- ◆ 即便在此理想实验情形下，由地震波场最终实现（岩心尺度上的）岩石物性参数的可靠估计也是不可能的。

三、从针对储层的、定量的地震波成像到定量的储层描述

◆ 储层岩石物性的多尺度特征及描述方式的多尺度特征：

◆ 2、实际介质情形

- ◆ 在地震特征波长尺度上，在实际介质情形下，地震波成像结果（Big_Imaging成像）在低精度情形下，但还是可信赖的。
- ◆ “两宽一高”地震数据采集+FWI/FWI_Imaging在海上油气勘探中有一些成功的实际应用，在一定程度上，这就是在地震特征波长尺度上，反映了地下岩石介质物性参数的等效、平均意义下的变化。
- ◆ 但是，实际介质情形下，**岩心尺度上的、定量的岩石物性参数（Little_Imaging）估计完全没有成功的实例。**
- ◆ 根本原因应该是：
 - ◆ **弹性参数成像结果尺度与岩石物性参数估计结果尺度之间不匹配。**
 - ◆ **弹性参数与岩石物性参数之间的关系可能是强非线性的。**
 - ◆ **弹性参数（譬如波阻抗）转化为岩石物性参数的过程是强非线性的。**



三、从针对储层的、定量的地震波成像到定量的储层描述

- ◆ 跨尺度的油气藏描述（即岩石物性参数描述）的合理逻辑应该是什么样的？
 - ◆ 首要工作依然是提高Big_Imaging阶段弹性参数估计或反演成像的精度。
 - ◆ WPI提出的是CWI+WBIM的路线；
 - ◆ CGG提出的是FWI+FWI_Imaging的路线；
 - ◆ PGS提出的是背景速度和反射系数同时迭代反演的路线。
 - ◆ 这是地震勘探尺度上要解决好的首要问题。



三、从针对储层的、定量的地震波成像到定量的储层描述

- ◆ **跨尺度的油气藏描述（即岩石物性参数描述）的合理逻辑应该是什么样的？**
 - ◆ **油气藏描述的跨尺度，应该是由地震勘探尺度（地震波优势频率对应波长的尺度）跨到岩心尺度下的油藏描述。**
 - ◆ **不应该提跨到薄片尺度下的油藏描述。**
 - ◆ **跨到岩心尺度下的油藏描述是Little_Imaging要解决的问题。**
 - ◆ **重点也不再是用现代图像增强技术刻画储层的几何形态（试图从米级、十几米级降到米级或米级以下），而是把宽带弹性参数成像结果定量地映射成储层岩石物性参数（主要是空隙度、渗透率等参数），进行定量的储层描述。**

三、从针对储层的、定量的地震波成像到定量的储层描述

◆跨尺度的油气藏描述（即岩石物性参数描述）的合理逻辑应该是什么样的？

◆我认为：

- ◆由于缺乏弹性参数与岩石物性参数之间的因果关系式，不可能进行类似Big_Imaging的参数反演。
- ◆合理的方法：三种测量或感知储层岩石物性（变化）的方式获得的关于岩石物性的信息在空间分布范围上不同，在尺度上不同，在精度（或可靠性）上不同，如何有机地把它们融为一个整体，更好地服务于油藏开发，是油气地球物理的十分根本的问题。
- ◆地震波反演成像、岩心分析结果和测井结果统一在岩心尺度（特征尺度约10厘米到数十厘米）上，用空间数据（信息）融合的数学理论框架，进行岩石物性参数的定量描述是合理的方法技术选择。
- ◆这应该是Little_Imaging今后几十年的发展路线。

◆信息提取+信息综合+最佳决策



三、从针对储层的、定量的地震波成像到定量的储层描述

◆ 跨尺度的油气藏描述（即岩石物性参数描述）的合理逻辑应该是什么样的？

◆ 基本的理论框架应该依然是Bayes决策/推断：

- ◆ 假设储层岩性参数（岩石骨架成分、孔隙度、渗透率）为 m ；弹性参数为 μ ；实测波场为： d ，它们之间的联合概率密度为（Tarantola,2005）：

$$\Theta(d, \mu, m) = \theta(d | \mu, m) \theta(\mu | m) \mu_M(m)$$

- ◆ 上式的合理表达为：

$$\Theta(d, \mu, m) = \theta(d | \mu) \theta(\mu | m) \mu_M(m)$$

- ◆ 理论上，联合概率密度函数的最大化，可以作为储层岩性参数和弹性参数估计的准则。

- ◆ 其中， $\theta(\mu | m)$ 代表储层岩性参数和弹性参数之间的相互依赖关系。到目前为止，这个依赖关系是不确定的。大量的岩心实验、分析结果未必能确认这个关系的具体形式。实际工作中也是不现实的。不可能获得如此大量的岩心和实验室测试分析数据。 $\theta(d | \mu)$ 代表实测波场与弹性参数之间的关系，各种波动方程代表了这种关系。我认为这个关系目前不存在大问题。43



三、从针对储层的、 定量的地震波成像到定量的储层描述

◆跨尺度的油气藏描述（即岩石物性参数描述）的合理逻辑应该是什么样的？

◆基本的理论框架应该依然是Bayes决策/推断：

- ◆这应该是任何基于物理系统的输出，通过数据分析，弄清物理系统物性参数的最高理论框架。
- ◆（针对油藏描述的）地震数据分析当然也是如此。
- ◆今后，我们要做的工作是如何在这个最高理论框架下，发展出有效的方法技术，尽可能好地实现对储层岩石物性参数的定量描述。
- ◆我相信这需要一个策略+技术流程实现，而不是一个数学算法实现。



三、从针对储层的、定量的地震波成像到定量的储层描述

◆ 跨尺度的油气藏描述（即岩石物性参数描述）的合理逻辑应该是什么样的？

◆ Geostatistics方法是当前比较合理的逻辑路线：

- ◆ Bayes推断的目标：产生一个可靠的、尽可能定量的、能很好地指导开发的油藏模型。当然应包括油藏几何形态的描述，**但根本的是孔隙度、渗透率的数值模型。**
- ◆ **Geostatistics**是Bayes统计推断在勘探地震中的一个应用实例。这与FWI是Bayes参数估计在勘探地震中的一个应用实例是对应的。
- ◆ **Geostatistics**的核心思想是：依据井中提供的储层参数的先验信息，在地质信息约束下，随机生成一组储层（参数）模型。在零偏移距地震道位置，生成合成的地震道。二者的差达到预设值，随机生成的模型被接受。可能有若干个储层模型被接受。评估模型的不确定性，决定用哪个模型代表地下介质的实际。
- ◆ **Geostatistics**的优点：a)产生一组储层（参数）模型；b)随机模拟可以**突破地震分辨率的限制**描述储层的非均质性；c)可以评价解的不确定性。
- ◆ **Geostatistics**的重点在于：**如何**生成能包含地下介质实际的储层（参数）模型；**如何**把这个模型选择出来；**如何**评价这个模型。



三、从针对储层的、定量的地震波成像到定量的储层描述

◆ **CWI+WBIM+Geostatistics**进行跨尺度的油气藏描述（即岩石物性参数描述）的逻辑路线：

- ◆ 依据井中提供的储层参数的先验信息，在地质信息约束下，随机生成一组储层（参数）模型。在任意伪井位置，在岩石物理关系约束下储层参数模型映射成宽带阻抗，与WBIM的宽带阻抗差达到预设值，随机生成的储层参数模型被接受。可能有若干个储层参数模型被接受。评估模型的不确定性，决定用哪个模型代表地下介质的实际。

目录

- ◆一、油气藏描述的本质
- ◆二、油气藏描述对地震波成像的需求
- ◆三、从针对储层的、定量的地震波成像到定理的储层描述
- ◆四、结论与讨论

四、结论与讨论

- ◆ 油气勘探的根本目的：精确地、甚至定量地描述油气藏，获得最佳的勘探效益。
- ◆ 描述油气藏，本质上，就是弄清储层岩石的物理性质（岩石骨架、孔隙及流体）。
 - ◆ 也包括对储层岩石几何形态的刻画。
- ◆ 钻井岩心（岩石露头）分析、测井、地震波成像是获取储层描述信息的三个来源。对应地，就有三种测量或感知储层岩石物性（变化）的方式。
 - ◆ 测井和地震波成像是物理感知储层岩石物性（变化）的方式---间接方式。
 - ◆ 对岩心（岩石露头）直接观测分析的方式---直接方式

四、结论与讨论

- ◆ 钻井岩心（岩石露头）分析、测井是局部地、小尺度地描述储层岩性（变化）。
- ◆ 地震波成像是**在全三维探区以地震波波长尺度**感知储层岩石物性（变化）。
- ◆ 油气勘探与开发，本质上，期望在开发尺度上描述储层岩性（变化），而且是在三维探区上以这样的尺度描述储层岩性（变化）。
 - ◆ 即在薄片到岩心尺度（也包括测井尺度）上描述储层岩性（变化）。
- ◆ 但是，上述三种测量或感知储层岩石物性（变化）的方式在尺度上是很不相同的。在精度上（或可靠性上）也是很不相同的。



四、结论与讨论

◆因此，我认为：三种测量或感知储层岩石物性（变化）的方式获得的关于岩石物性的信息在空间分布范围上不同，在尺度上不同，在精度（或可靠性）上不同，如何有机地把它们融为一个整体，更好地服务于油藏开发，是油气地球物理的十分根本的问题。

◆我认为：地震波反演成像、岩心分析结果和测井结果统一在岩心尺度（特征尺度约10厘米到数十厘米）上，用空间数据（信息）融合的数学理论框架（即Bayes推断的理论框架），进行岩石物性参数的定量描述是合理的方法技术选择。CWI+WBIM+Geostatistics的方式是合理的逻辑路线。



四、结论与讨论

◆在这个过程中，三种测量或感知储层岩石物性（变化）的方式**如何**获得精度更高的反映储层岩性参数变化的结果，**如何**把地震波成像结果映射成储层岩性参数，**如何**把不同尺度（或不同分辨率）的信息有机地融为一个全三维空间上的、精度更高的、自洽（而不是矛盾）的储层岩石物性（变化）参数的数据体，是定量油气藏描述要解决的关键问题。

◆提一个所谓的跨尺度的波动方程，包含储层岩性参数，在Bayes估计理论下，进行类似FWI的反演，是走不通的死胡同！



谢谢
欢迎批评指正