



地质建模方法综述

—— Weilmann, 2018

3D地质构造建模：概念, 方法和不确定性



1 引言

structural geological model (geological models or geomodels), 表征几何元素, 如岩石单元边界、断层、层位和尺度从米到千米的侵入体。

地质模拟与地球物理是联系的, 因为可视为某些具体方面的地质知识的空间描述。地质模型提供地球物理正演模型的空间参数化, 包括地球物理数据处理和反演框架。同时, 地球物理观测和解释通常作为地质模型的重要输入, 地球物理观测通常用于验证地质模型以及油藏模型。



1.1 构造地质模型中考虑的地质知识

难以直接观测地下的物理元素的空间分布。

需要整合所有可获取的观测、测量和知识，获取对地下结构的了解。

地下物理元素的空间分布不是随机的，是复杂的且是漫长的地质演变的结果。

geological realism



1.1.1 自然岩石构造的例子

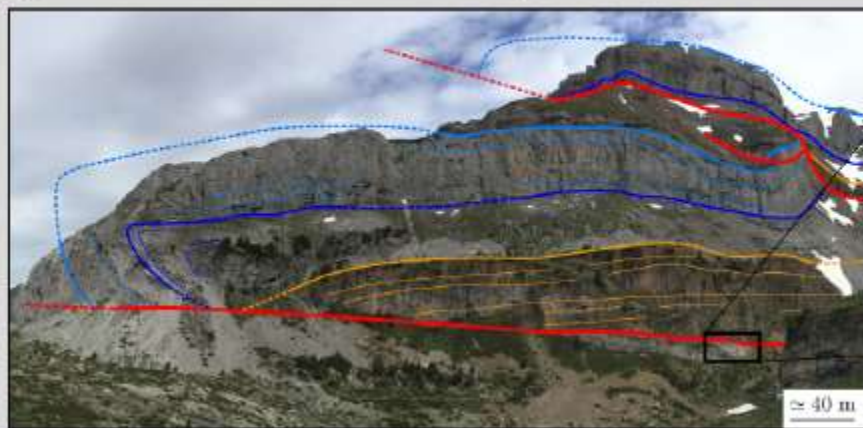
Pyrens (Argon, Spain)的褶皱碳酸盐岩层，图1a，展示了相关的沉积和地质过程。

从层序地层学原理推测地质历史

不能定量地了解整个复杂的历史，但是可以在3D空间中考虑构造地质模型的面(surface)，即捕捉在复杂的漫长历史中形成的地质事件本质。

露头或地球物理勘探得到的关于地下构造的稀疏的数据。

(a) Natural rock structure

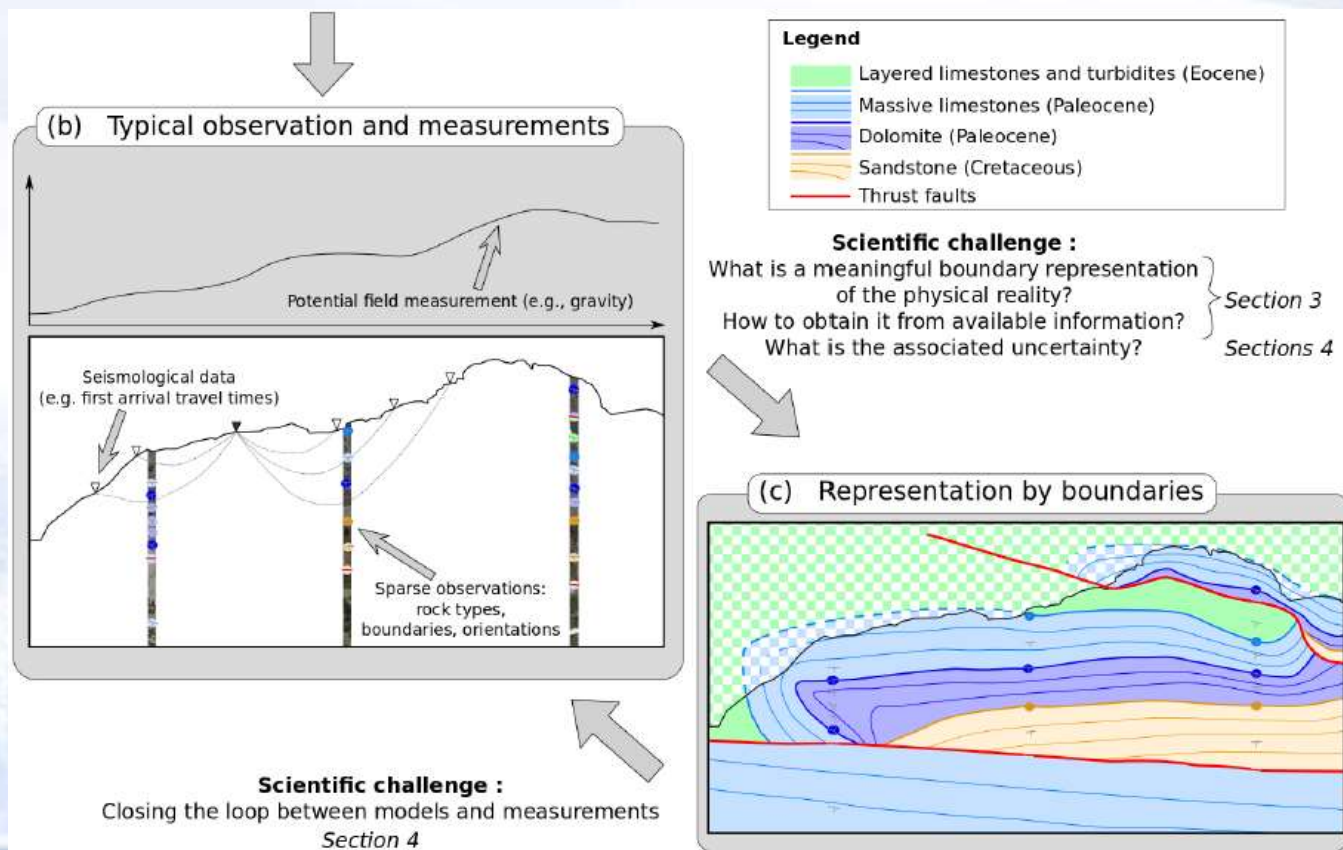




1.1.1 自然岩石构造的例子

问题：是否能从获取的有限的信息（图1b）得到几何表征？钻孔数据是直接观测但在空间中的测点很有限；地球物理勘测是间接观测。

地质建模的基本原理就是在3D空间中合理描述几何和拓扑特征（图1c）。





1.1.1 自然岩石构造的例子

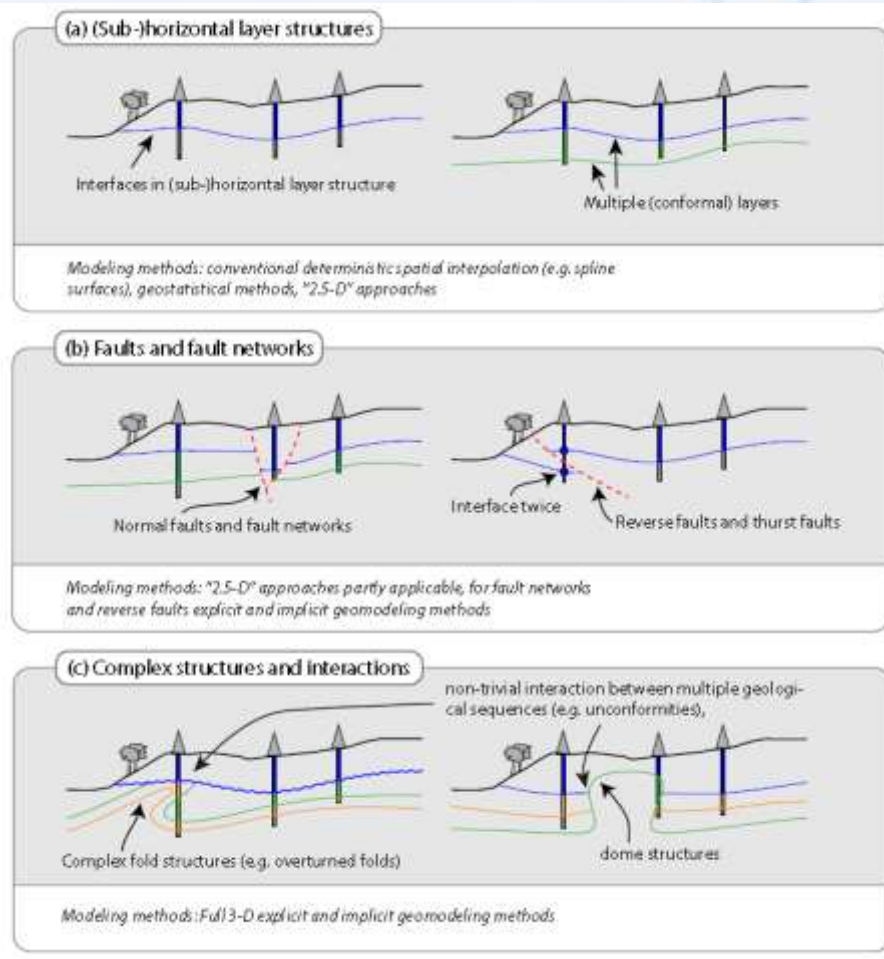
地质模型，在更细尺度变化上可视为框架模型(**framework model**)，例如使用地质统计学方法。因此，通常将地质模型也视为层级模型(**hierarchical models**)，整合多种尺度。

由于我们掌握的知识和信息是有限的，局部上的描述是不精确的，如图1a与图1c之间有差别，图1a是真实地质，图1c的模型中表面更光滑，且模型露头中没有出现小的可见的断层。越来越多的研究评价地质建模中的不确定性。



1.1.2 模型复杂度

地质模型需要表征多大程度的复杂度？这里的复杂度仅指几何意义上的复杂度。我们考虑的复杂度层级如图2，以及感兴趣的地质特征的数目（例如界面接触等）及这些地质特征之间的可能关系。

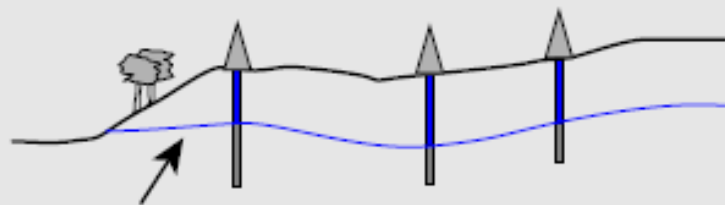




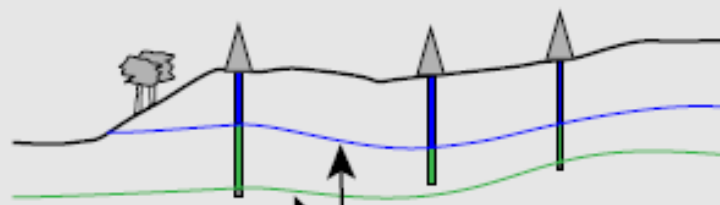
1.1.2 模型复杂度

地质模型中最简答的构造元素是层位之间连续的界面，如图2a：点位(x,y)以及界面有精确的z值，是点位的函数，即 $z=f(x,y)$ 。称该方法为map-based method，此时可以使用很多地质统计方法。有多个分层时情况变得稍微复杂些（如图2a的右侧图）。

(a) (Sub-)horizontal layer structures



Interfaces in (sub-)horizontal layer structure



Multiple (conformal) layers

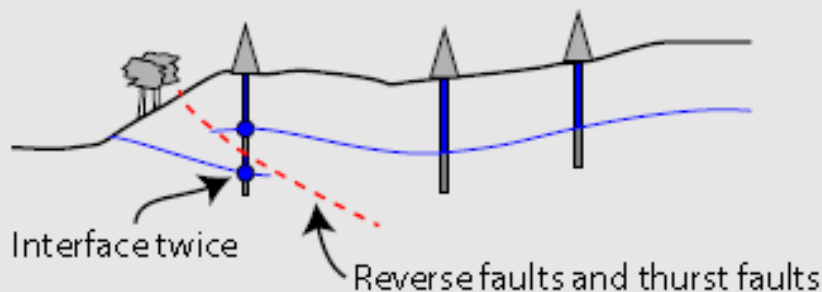
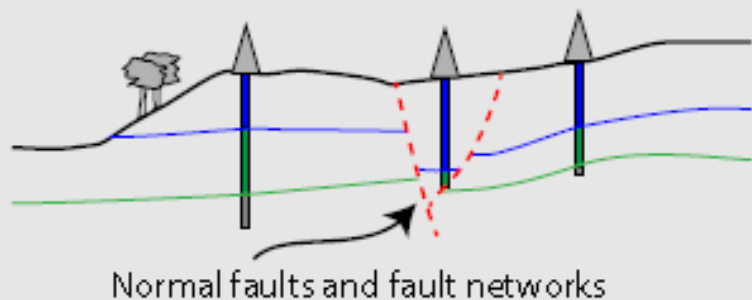
Modeling methods: conventional deterministic spatial interpolation (e.g. spline surfaces), geostatistical methods, "2.5-D" approaches



1.1.2 模型复杂度

当考虑断层或断层网时情况边的更复杂，如图2b，特别是存在逆断层的情况，存在双值问题，如图2b右侧图，即在点位(x,y)出现2次z值，map-based方法的插值法不适用了。

(b) Faults and fault networks



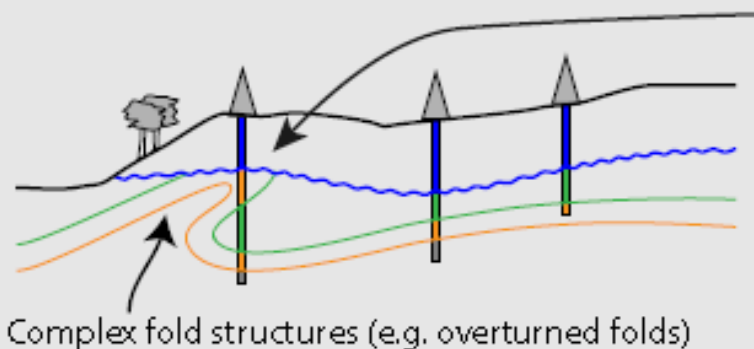
Modeling methods: "2.5-D" approaches partly applicable, for fault networks
and reverse faults explicit and implicit geomodeling methods



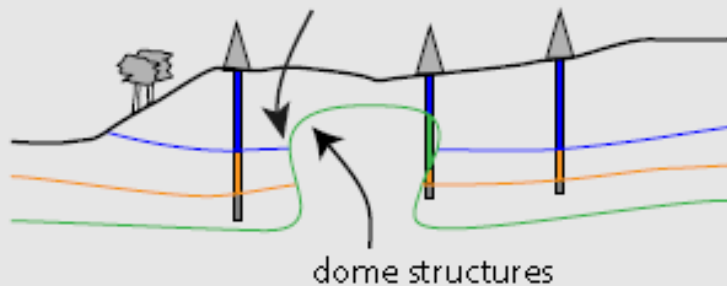
1.1.2 模型复杂度

当存在多个沉积序列和不整合接触、侵入、倒转褶皱导致双值界面（与逆断层类似）、穹隆构造等，情况变得更复杂，如图2c。

(c) Complex structures and interactions



non-trivial interaction between multiple geological sequences (e.g. unconformities),



Modeling methods: Full 3-D explicit and implicit geomodeling methods



1.1.2 模型复杂度

总的来说，断层、断层网、变形或侵入等增大了复杂度，很多传统的插值算法不适用，需要使用全**3D**地质建模技术，包括显式建模（3.1.3节）和隐式建模（3.2.3节）。

需要考虑的地质复杂度是重要的，因为这与选择合适的建模算法密切相关（第3节讨论），以及分析建模的不确定性（第4节）。这也是地球物理勘测与以地质为导向的分析方法产生分歧的地方。

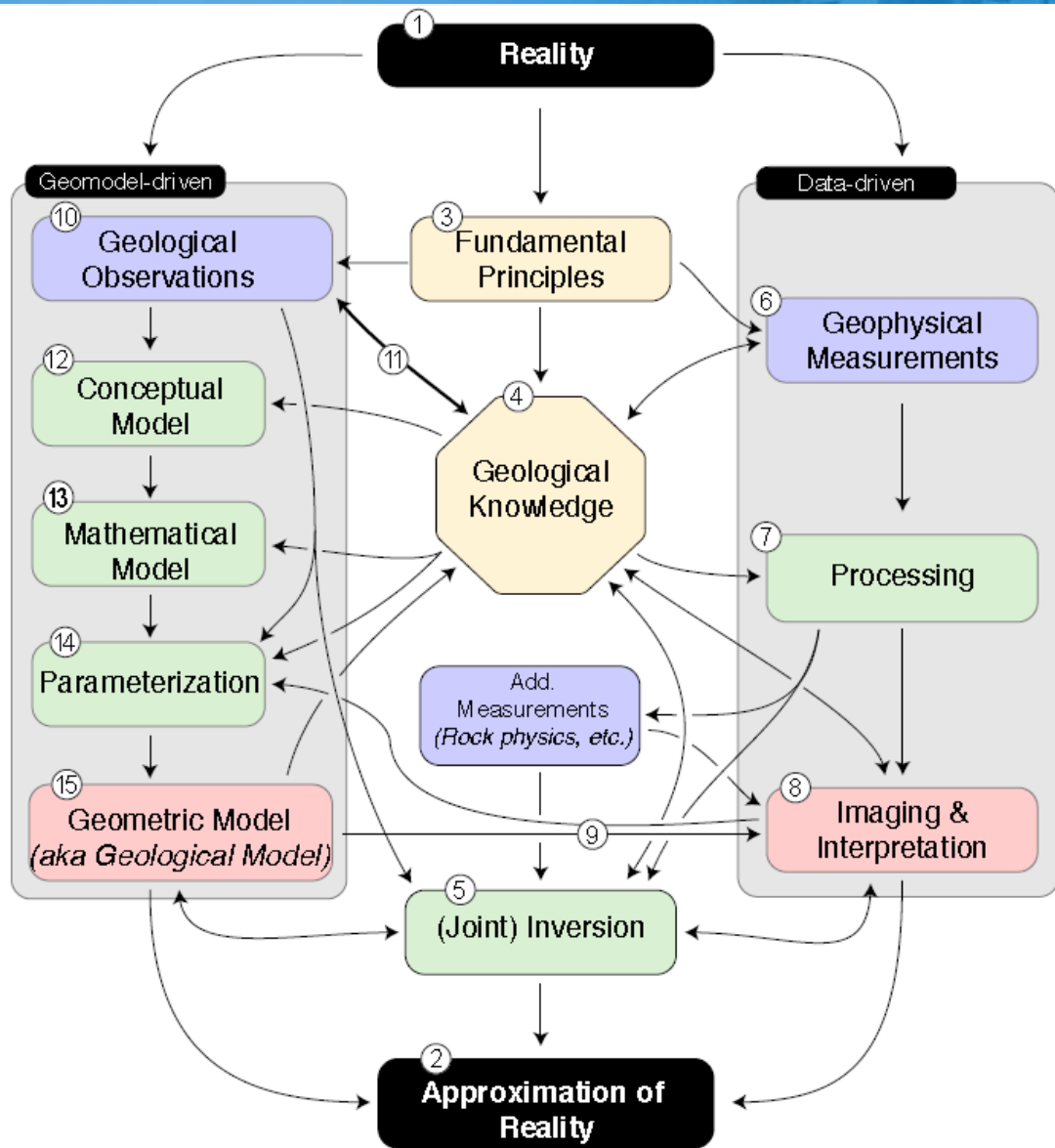


1.2 地质界面识别的2种视角

地球物理学家和地质学家长期关注界面识别(interface detection)的问题。形成2种观点：

基于地球物理勘探数据和观测，识别界面的方法，称为数据驱动(data-driven)方法。

基于地质观测和认知的分析方法，称之为地质模型驱动(geomodel-driven)方法。



两种方法的本质如图3。

图3



1.2 界面识别的2种视角

两种方法都起始于相同的目的：物理真实的地下构造①，通过使用不同类型的观测、不同的数学和数值模型方法，最终实现真实的近似②。

两种方法都包含很多步骤，有共同之处：都是基于基本原理③，如物理定律和地质原理。下面审视地质知识④的角色，强调联合反演方法⑤的作用，作为联合地球物理信息和地质知识的基本方法。



1.2.1 数据驱动(data-driven)方法

地球物理的数据驱动方法从地球物理勘探⑥开始，勘探方法很多，或者为了具体的目的，或者是区域性测量。如地震波勘探(Yilmaz, 2001)。

在经过细致的数据处理⑦后，获得地球物理勘探解释。例如地震处理过程涉及的原始数据处理、叠加、偏移、时深转换获得反射成像(Yilmaz, 2001)。地质知识可以参与到这些处理过程。但有些地震数据处理，例如评估地下的速度模型时，利用有限的地质信息生成地震成像，需要使用光滑约束，而地质上有很多多尺度的尖锐边缘，如露头和自然的岩石界面（图1a）。



1.2.1 数据驱动(data-driven)方法

有2种处理数据的方法：（1）对处理数据做直接解释⑧；（2）联合其他的数学方法做反演⑤。第1种方法需要联合地质知识，得到合理的解释，但在解释断层的数目、几何和连接关系时仍存在不确定性。另外，地质模型为地球物理正演模型提供必要的信息。通常，解译图像或地球物理图像是数据驱动分析工作流程的终点，作为为了具体目的的合理的现实近似②。



1.2.1 数据驱动(data-driven)方法

使用反演方法⑤的第2种方法，实现从地球物理勘测④到最终的模型⑥。这里强调各种反演方法与地质知识的联系，特别是与界面识别的几何模型的联系。反演方法的直接输入要么是使用处理的地球物理测量⑦，要么是从图像和解释步骤⑧的成果。例如，反演密度或速度分布或从地质模型反演界面位置，这里与地质模型本身⑨的联系是明显的。



1.2.1 数据驱动(data-driven)方法

尽管地质见解有助于地震解释，但即使使用现代的地震勘测和处理技术，速度模型仍然具有模糊性(non-uniqueness)，例如近年来开展的**full waveform inversion**方法，可认为是数据驱动方法，其结果仍然依赖于初始的（基线）速度模型。地球物理数据反演没有完全“客观的”结果。

数据驱动方法的基础问题是：如何获取地质知识？在“数据驱动”方法的哪个合适步骤中可实施地质的考虑？这些问题将在“地质模型驱动方法”的框架中得到解释。



1.2.2地质模型驱动(geomodel-driven)方法

从区域的地质调查，地质界面，以及相关的地质概念开始，拓展到3D的地质模型。这种方法的核心是：理解地质模型构建的相关步骤以及相关的不确定性。

地质勘测的主要数据，如露头 and 测井⑩.观测与地质知识11的联系变得很重要，例如露头中地表方向的测量需要地质知识，或者断层面的识别，这涉及地质学的经验概念。

概念模型12，需要考虑所有的地质元素和信息，是在空间中做几何插值13，得到合理的数学模型的基础。代表性的插值函数和相关的假设与限制将在第3节介绍。

当定义好数学模型使用的插值方法后，可以分配地质观测作为这类模型14的参数。最常见的地质观测就是界面点，但直接整合方向观测仅能在一些插值算法中实施(Lajaunie et al., 1997; Hillier et al., 2014)。还有的插值函数可以考虑地层厚度信息，如动力学算法(Jessell, 1981; Wellmann et al., 2016)。



1.2.2地质模型驱动(geomodel-driven)方法

除了直接的地质观测与测量，解释的地球物理图像和剖面⑧，也常常用于插值函数的参数输入。

除了基于地质和地球物理观测的参数以外，各插值函数还需要具体的参数。有时这些参数需要基于观测做计算，如地质统计学插值中的协方差函数的参数，但通常是基于普遍的行为，如界面的光滑性。此外，我们通常需要应用多种插值函数，来表征不同的地质层序和构造，然后还要定义这些函数的相互作用。第3节将介绍数学插值函数和模型参数化。

全3D可视化展示界面，作为边界表征，或者基于离散网格结构的体模型(Caumon et al., 2009)，这些3D表征通常称为构造地质模型(structural geomodel)或geological model。



1.2.2地质模型驱动(geomodel-driven)方法

注意到：3D地质建模过程中包含着多种不确定源。本质上，地质模型仅是一个或几个插值函数和定义参数的表征结果，实际上一些商业地质建模软件隐藏了这些不确定性，是“黑箱”模型。理解和处理不同类型的不确定性，需要自动化更新地质模型。当选择和设置数学模型13和参数14变的透明时，自动化建模才变为可能。

自动化建模为评估地质建模的不确定性建立可能，计算、定量评估和可视化这些不确定性对地质模型的影响将在第4节介绍。重要的一点是：自动化 workflow 允许整合了地质建模步骤到反演方法中，另外也通过在联合反演方法5中使用地质模型，整合了地质建模与地球物理观测。整合的基础是：在从地质模型获得的岩石特性空间分布基础上的地球正演模拟。



1.3 典型的输入数据

图4展示了地质建模需要的典型输入数据。

- 地表数据，包括：遥感影像、素描、地理参考的构造观测、描述岩性，不整合，断层、地层方向、断层层位等的测量。这些数据可直接用于**3D**建模，但通常需要首先转换为**GIS**地图和剖面。
- 地质图和剖面，源于**2D**解释，填充地表观测之间的间隙。**3D**可视化有助于解释这些空间上连续的地图。
- 钻孔数据，包括钻孔芯和地球物理测井。
- 地球物理勘测，包括：直接解释或处理后提供的**3D**成像。
- 流体数据：间接反映出地下储层的岩石连通性。



1. 3典型的输入数据

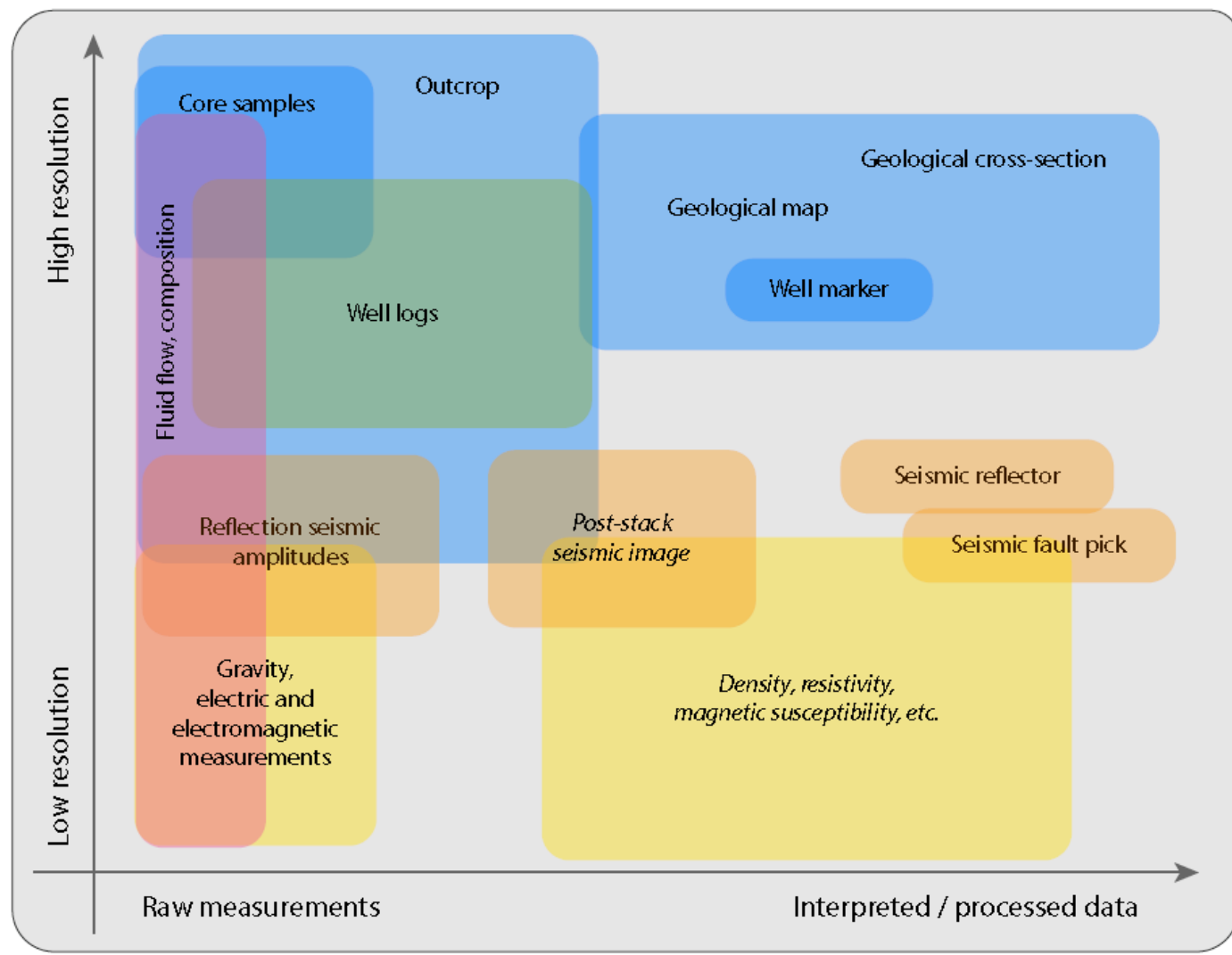


图4



2 地质模型不确定性的分类和来源

2.1 模型构建过程中的不确定性

2.2 数据和观测的不确定性



3 地质建模方法

地质历史和解释概念都可转换为地质模型：（1）数学和数值上定义和表征地质产状；（2）考虑可获取信息的构造模型的工作流。

3.1地质建模：基本原理

3.1.1地质模型表征

图6展示了表征可能的地震波速场的各种地质模型(geomodel)，对应的1D剖面显示了真实的场（红色）和各种模型近似表征（黑色）。这些模型都是基于稀疏测量插值到相同的构造几何上生成的。展示了用于数值固体和物理模拟的基本原理，即将感兴趣的区域分解为边界表征或离散为结构或非结构网格。



3.1地质建模：基本原理

3.1.1地质模型表征

计算物理中，所有这些地质模型表征都在数学上描述为 K 个基函数的形式：

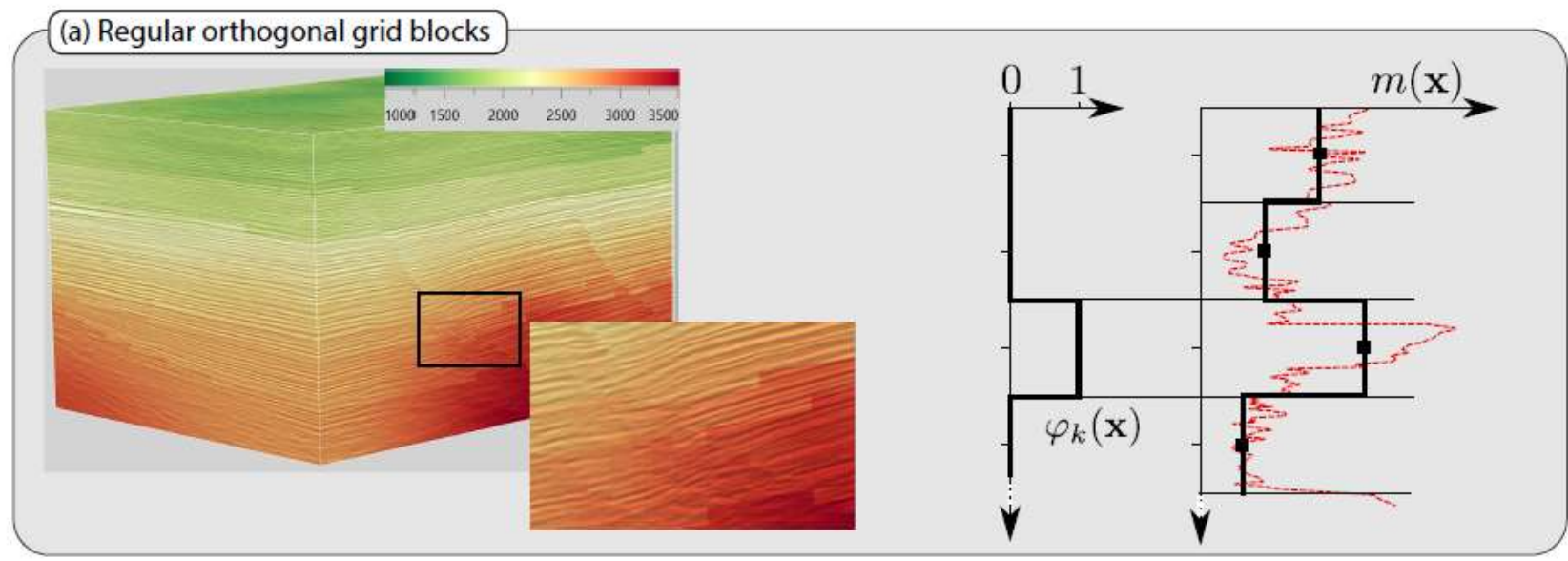
来获取在所有可能位置 \mathbf{x} 上的值 m ，作为对真实的近似（图3）。图6中， m 是速度场， K 是节点数（或网格块），在节点处存储标量速度值 m_k ，表示网格上的插值函数。函数定义参数的几何结构。对使用何种插值函数能反映计算域中已知变量，没有统一结论。



3.1地质建模：基本原理

3.1.1地质模型表征

图6(a)选择规则正交网格块，对应分段常数基函数。

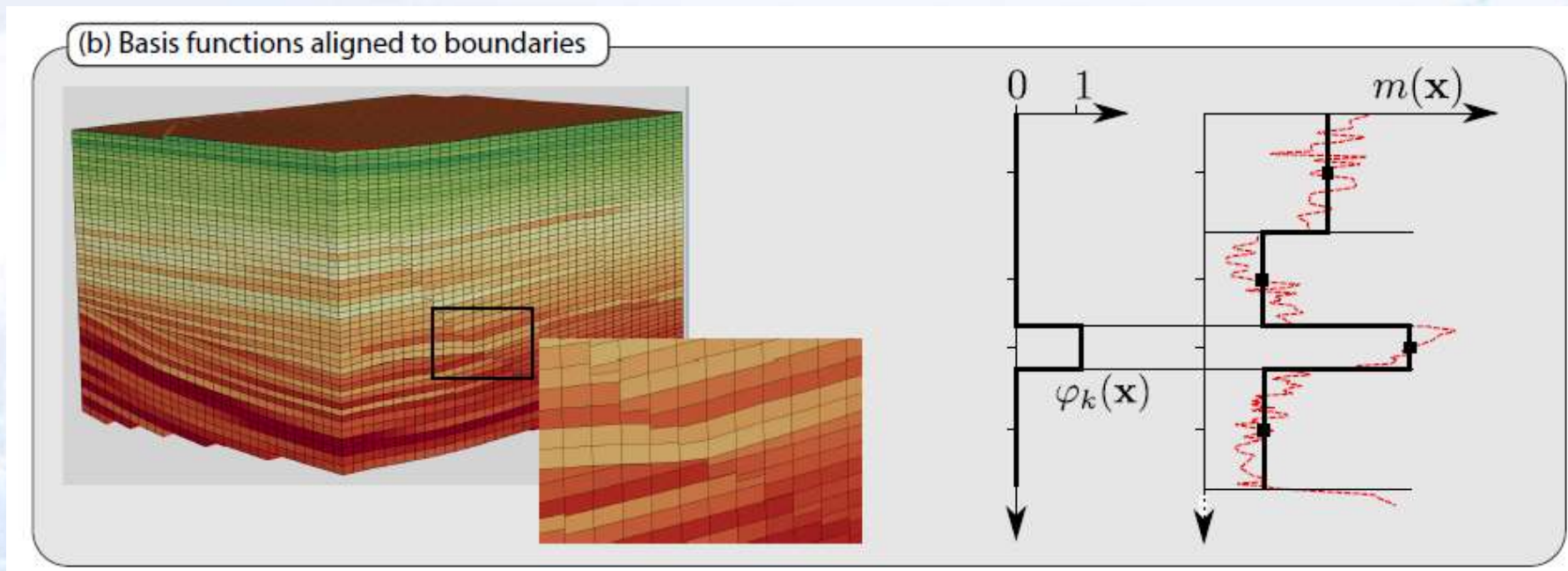




3.1地质建模：基本原理

3.1.1地质模型表征

图6(b)基函数在垂向上拉伸或压缩，与分层边界平行，对应油藏模拟中的角点地层网格。但可以清楚地看到：该种模型表征中断层是近似为阶梯状的。



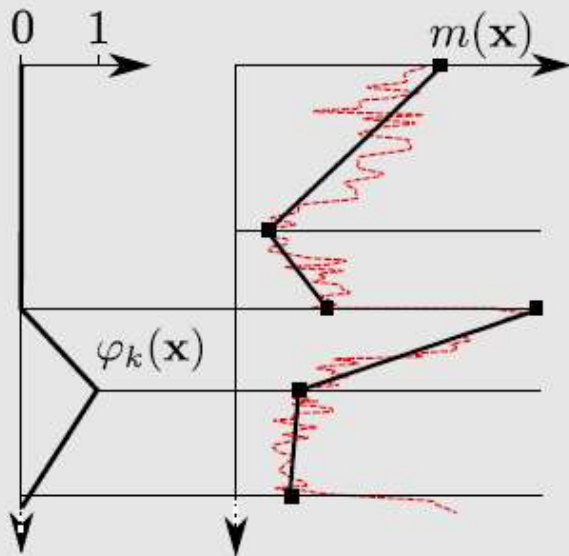
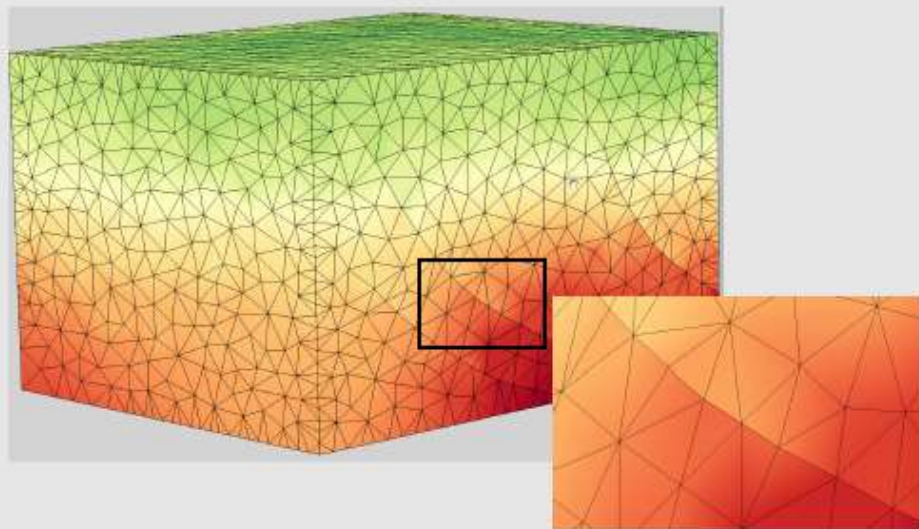


3.1地质建模：基本原理

3.1.1地质模型表征

图6c显示了线性四面体网格，用于更好地近似断层几何。四面体与断层面协调，但与层位断面不协调。速度场线性插值到四面体网格节点。四面体网格很少用于矿山地质统计以外的领域。四面体网格单元还能细分，如XFEM。

(c) Linear tetrahedral mesh for better fault approximation





3.1.4地质建模流程

"较老的地层不能修改较年轻的地层"，这用于动力学模拟方法(PyNoddy)：完全由地层年代决定的拓扑操作，整合地质边界。但这种方法的挑战是：难以建立地质对象之间的相对年代。并且，所有可获取的观测点记录的都是现代的几何和拓扑，不是过去的状态。这是为什么地质建模商业软件，如SKUA-GOCAD, Petrel, Geomodeller等，都是先建模地质不连续体，如断层和侵入，然后再是考虑地层面。

不同的建模顺序通常意味着迭代和模型更新作为构建步骤(Caumon et al., 2013b)。考虑地质专家的知识，在迭代过程中降低不确定性，获得“最佳的”地质模型。



3.2地质构造的数值表征和插值

地质建模方法：

- (1)直接构建地质界面（显式构造建模方法）：通过2D方向图间节点插值，定义各地质界面。因为面是嵌入到3D空间中的，这些面并不定义为封闭的体，建模还需要将数据点投影到这些面。
- (2)构建标量函数，该函数的等值面作为地质面。标量函数可视为到界面的符号函数，或者为相对地质时间函数。隐式方法不需要数据投影。



中國地質大學
China University of Geosciences

艰苦朴素 求真务实

温家宝

艰苦朴素
求真务实
温家宝

3.2.1 显式方法：地质图和拉伸(2.5D)





中國地質大學
China University of Geosciences

艰苦朴素 求真务实

溫家寶

3.2.2完全3D建模方法：显式方法

艰苦朴素
求真务实
溫家寶

中國地質大學



中國地質大學
China University of Geosciences

艰苦朴素 求真务实

温家宝

3.2.3完全3D建模方法：隐式方法

艰苦朴素
求真务实
温家宝

中国地质大学



3.2.4 验证和更新地质模型

模型质量

解释点与模型面的不匹配

主观性，地质单元结构更多的是视觉上的简洁性。

定量方法涉及厚度图和体积计算。使用重构技术和变形分析检验重构的几何是否与可能的变形历史兼容。

最后，计算模型预测还需要与观测比较，例如含水层的水头和示踪数据，波传播历时和达到时间等）。



中國地質大學
China University of Geosciences

艰苦朴素 求真务实

温家宝

艰苦朴素
求真务实
温家宝

中国地质大学



中國地質大學
China University of Geosciences

艰苦朴素 求真务实

温家宝

艰苦朴素
求真务实
温家宝

中国地质大学



中國地質大學
China University of Geosciences

艰苦朴素 求真务实

温家宝

艰苦朴素
求真务实
温家宝

中国地质大学



5讨论与结论

5.1讨论

5.1.1关于两种模型构建的观点

“数据驱动方法”会导致错误，特别是当低于地球物理分辨率的地质特征对模型预测表现出显著影响的情况。另外，数据驱动反演会导致地质模型与地质概念或观测明显矛盾，称之为客观模型则是不合适的了。

相反地，对“地质模型驱动方法”的批评有：(a)起始于主观信息，可能引入模型预测的分歧；(b)包含不能被验证的解释元素；(c)引入了没有数据支撑的复杂性。

模型构建是为了某种目的，目的决定了建模的尺度和抽象程度。

fit-for-purpose models or purpose-driven geological models，例如，一些工程应用，包括：油气藏工程、采矿和土工应用。地质建模还有其他的研究，例如地质调查时，将**2D**地质图拓展至**3D**地质模型，此时地质建模可视为拓展地质知识的努力。

地质模型作为交流工具。



5.1.2 关于选择合适的地质建模方法

使用电脑自动地生成由熟练的地质学家可接受的地质模型，是个问题！

隐式建模的应用案例：英国的全国范围的地质模型(Kessler et al., 2009)。

构造建模涉及2个主要方面：（1）填充数据点之间空白区的插值；（2）CAD操作，包括：intersection、trim、weld等。

考虑到“容易使用”和“灵活性”，评价各种建模方法将是困难的。建模者对某软件的熟悉程度将影响建模结果，对于相同方法，使用不同的用户界面也会影响视角。



5.1.2关于选择合适的地质建模方法

在评价各种方法优缺点之前，我们给出一些评判标准：

- 期望的地质复杂度
- 计算能力和内存要求
- 考虑各种类型数据的能力
- 考虑地质知识的能力
- 输入参数的数目
- 模型更新
- 模型目的



5.1.2 关于选择合适的地质建模方法

基于以上准则，下面分析显式建模与隐式建模的区别，列于表1。还可以参考Jessel et al. (2014)。

表1 比较各种建模方法

Method	Extrusion	Explicit 3D surface	Implicit surface
Representativeness	Simple “2.5D” domains	High	
Memory requirements	one 2D scalar field	three 2D scalar fields	one 3D scalar field
Topology	Fixed and controlled (open surface)	Fixed and controlled	Arbitrary (emerges from interpolation)
Point data	Yes, need projection		Yes, no projection involved
Orientation data	difficult (need projection, non linear		Easier, no projection involved
Conformable surfaces	iterative, involves projections		direct
Dealing with discontinuities	Possible using Boolean operations or domain subdivision		



5.1.2 关于选择合适的地质建模方法

拉伸(**Extrusion**)方法(**pillar**方法): 缺少适应在任意方向上具有方位的多个地质表面相适应的灵活性。

3D显式方法: 已经达到很高的成熟度。因为是基于**2D**表面, 因此可以紧凑地描述**3D**实体。在**2D图(graphy)**上实施插值很有效率, 但显示建模通常需要控制大量的几何和拓扑操作, 这些操作(例如三角化或**NURBS**表面的相交), 尽管看似简单, 但由于浮点精度有限, 很难健壮地实施。在构造相对简单的情况下, 建模可以自动化, 当应用于复杂构造时, 通常需要大量的手工编辑。可以使用**off-surface**构造方向(**orientation**)数据和层厚度(需要在一定的假设情况下实施)。创建体网格时需要简化显式的表面表征, 如**stair-step**近似。可以创建非结构网格框架模型, 但地质统计模拟和过程模拟会变得比拉伸的规则网格要困难。



5.1.2 关于选择合适的地质建模方法

隐式方法：近期发展的方法，但引起广泛关注，已在一些商业软件中实施，如Leapfrog, Geomodeller, SKUA-GOCAD, Petrel（基于实体的建模）。优点：（1）隐式方法考虑体数据，整体上相比基于表面的建模方法给更健壮和自动化；（2）隐式方法避免了大量插值计算，这意味着无需专家输入，即可自动化获得复杂形状。与基于表面的建模方法相比，隐式方法插值也可以修改隐式表面的拓扑关系，这在拓扑关系未知的情况时是有优势的（例如喀斯特或矿体建模），但对于拓扑关系需要控制的情况会是一个问题（例如防止地层面形成Blob），见Collon et al., 2016；（3）隐式方法无需任何投影即可使用多种构造数据(Calcagno et al., 2008)。（4）就像拉伸方法一样，可生成整合地层表面的连续体，且不需要限制断层网的类型。（5）隐式方法可以处理复杂变化的厚度(Laurent, 2016)，就像插值计算中的各种规则化项，光滑表面曲率变化和层厚度变化。尽管近期研究考虑各向异性的解决方法，但隐式方法由于计算和存储限制，仅能表征有限的不整合。（6）在模型更新方法，插值的自动化显著提高新的构造不确定性建模方法的效率(De la Varga, et al. 2018)。缺点：（1）确定性的更新模型，缺少直接的表面操作，局部更新模型就是增加新的数据点，重新插值，此时使用基函数的局部方法比隐式方法的全局插值更有效率。（2）如基于表面的方法，隐式建模方法依赖拓扑操作上的一些点，最终创建一个图像、边界表征或网格。这些操作在体数据结构上实施，比在表面上实施更困难。



5.1.2关于选择合适的地质建模方法

应用方面，隐式方法可以将每个地下的数据点映射到沉积空间，断层解释数据(Wu and Hale, 2015)，有助于储层模拟网格(Gringarten et al., 2008)。

Gringarten, E. J., Arpat, G. B., Haouesse, M. A., Dutranois, A., Deny, L., Jayr, S., Tertois, A.-L., Mallet, J.-L., Bernal, A., Nghiem, L. X., Jan. 2008. New Grids for Robust Reservoir Modeling. In: 2008 SPE ATCE. Society of Petroleum Engineers, Denver.



5.2 总结与展望

- **整合(Integration):** 涉及地质学家、地球物理学家和工程师等不同专业背景的跨学科知识。避免不同建模方法的感觉，接受基于实际(fact-based)的最佳方法，这要求显式地定义什么是“最好的”。
- **交流(Communication):** 不确定性是不愉快的，人们倾向于将不确定“隐藏”。期刊论文被认为是“说服性的”，需要在所有的建模中考虑不确定性，清晰地说出建模假设。
- **工具(Tools):** 鼓励地球科学学家考虑合适的建模“算法”，而不是建模“软件”。不能过于信任很贵的建模软件。



5.2 总结与展望

- **可视化(Visualization):** 可视化3D空间的不确定性仍然是困难的。
- **地质知识(Geological realism):** 大量的地质概念和观测难以整合入插值方法。
- **机器学习:** 有望编码化地质知识。
- **效率:** 模拟方法和反演方法的计算效率仍然有限，需要并行计算机，创建可以解释所有观测的精确模型。
- **尺度管理(Scale management):** 地质模型不可能描述所有构造。建模尺度与物理过程相关，可以表征地质细节和有重要影响的不确定性即可。这对未来的联合地球物理反演是重要的。



5.2 总结与展望

最后一句话概括地质学家与地球物理学家之间交流的困难所在 (Boschetti and Moresi, 2001) : Geologists may perceive geophysicists as being lost in an abstraction far removed from real geology; geophysicists often see geologists as hopelessly resistant to mathematical rigor.



中國地質大學
China University of Geosciences

艰苦朴素 求真务实

温家宝

艰苦朴素
求真务实
温家宝

中国地质大学