

文章编号: 1000-0550(2013)05-0878-11

# 三维地震约束多点建模降低井间砂体预测的不确定性<sup>①</sup>

王家华<sup>1</sup> 夏吉庄<sup>2</sup>

(1. 西安石油大学计算机学院 西安 710065; 2. 中石化胜利油田分公司物探研究院 山东东营 257000)

**摘要** 本文利用垦71断块的测井数据和三维地震数据,运用多点统计建模方法和软硬数据结合的原理,进行了油藏建模的井间砂体预测研究。本文的研究包括,三维地震数据的质量控制、软硬数据结合、多点统计学建模应用、训练图象的制作、砂体概率生成曲线的选用。在此基础上,本文利用测井数据和三维地震数据结合的建模结果,与仅用测井数据的建模结果进行了对比。这种分析和对比,以地震泥质含量剖面图为对比根据,分为三个层次:研究层段的上部和下部的砂泥岩分布对比,不同井及其周围地区的砂泥岩分布对比,不同随机种子产生的多个测井砂体预测剖面图之间、和多个井震砂体预测剖面图之间分别对比。本文结果可以说明,地震约束的多点统计建模结果明显地提高了井间砂体预测的合理性,并降低了油藏建模的不确定性。

**关键词** 油藏建模 不确定性 地震数据 测井数据 多点统计建模 训练图象 砂体概率生成曲线

**第一作者简介** 王家华 男 1945年出生 教授 地质统计学、油气藏地质建模算法及应用研究、计算机图形学在油田开发中的应用 E-mail: jhwang\_1@163.com

**中图分类号** P631.4 **文献标识码** A

## 0 引言

按照 Doyen 博士在 2007 年撰写的专著<sup>[1]</sup>的观点,利用地震数据约束油藏建模的过程,类似于测井数据的油藏建模过程。在这本专著中,他指出油藏建模通常都采用两步序贯算法:首先是沉积微相的建模,然后是物性参数的建模。这本专著的主要内容包包括,地质统计学内插与滤波、随机模拟与地震约束,利用地震数据的沉积相建模,地质统计学反演,统计岩石物理学和四维地质建模等方面的研究。本文研究的砂体预测问题,就属于上述的两步序贯算法中的第一步。这种算法,可以使得多个砂体空间分布的实现之间差别的减少,从而使得孔、渗、饱等物性参数预测的不确定性得以降低。

地质统计学反演,或称随机反演,近年来已成为一种测井和地震结合的有效方法。这个方法最初是由 Bortoli, Haas 和 Dubrule 等学者在上世纪九十年代引入的<sup>[2-4]</sup>。

为了在油藏建模中保持数据条件化的灵活性,同时再现弯曲复杂的沉积相结构,多点统计建模方法应运而生<sup>[5-7]</sup>。通过训练图像把地质先验认识和概念模型引入到储层建模中来,是多点模拟对油藏建模的

一个突出贡献<sup>[8]</sup>。地质学家和储层建模人员能够借助于露头类比、岩心分析、测井解释和地震图像得到储层沉积相结构和空间相关性的先验认识,然后以训练图像的形式指导井间沉积相预测<sup>[9,10]</sup>。

进一步,如何有效快速地生成训练图像和创建储存训练图像为目的的数据库,也是十分必要的<sup>[11,12]</sup>。

利用三维地震数据和测井数据相结合,则可以大大降低油藏建模中砂体预测的不确定性,从而提高井间砂体预测的可信性。本文则利用了多点统计建模方法和软硬数据结合的方法,对胜利油田的现场数据进行了处理。从井间砂体预测的角度,把三维地震数据和测井数据结合的建模结果,和单用测井数据建模的结果进行了比较,从中可以看出明显地降低了预测的不确定性。

## 1 地质背景

垦西油田位于山东省利津县,构造位置处于沾化凹陷中部,孤岛突起西南倾伏端。西北为渤南洼陷,南为三合村洼陷。研究区目前有井 120 口。其中大部分集中在西北边断层的南侧,而在东南部的大部分地区只有少数井。垦 71 断块位于垦西断层和垦西一号断层之间所夹持的垦西突起带的南侧、垦西断层下

<sup>①</sup>国家 863 重点项目“油藏综合地球物理技术”(2007AA0605)、国家自然科学基金项目“曲流河储层建模的自回避随机游走方法研究”(50874091)联合资助

收稿日期: 2013-04-15; 收修改稿日期: 2013-08-01

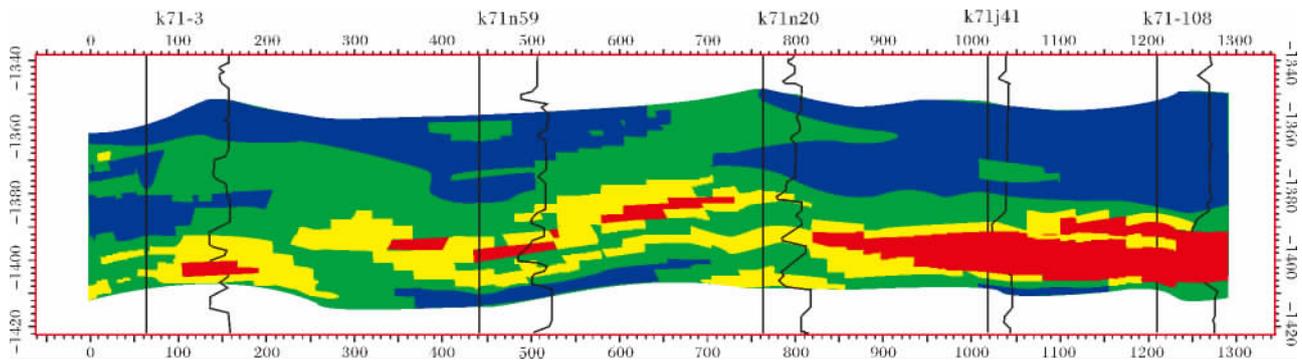


图 1 泥质含量反演数据和自然电位测井数据的对比: k71-3-k71n59-k71n20-k71j41-k71-108 剖面

Fig. 1 Comparison between inverse data for shale content and logging data for spontaneous potential:

cross section of k71-3-k71-n59-k71ln20-k71lj41-k71-108

降盘附近,其南的垦西断层为主干大断层,走向北东东,断面向南倾斜;其北的垦西一号断层,走向大致与垦西断层平行,断面总体向北西倾斜。垦西断层弯曲的内侧下降盘形成了垦 71 断块馆陶组断鼻组合和东营组逆牵引背斜的复合式构造。

垦 71 断块是垦西油田的主体开发区,于 1981 年 1 月投产,1988 年 6 月转注水开发,采用边缘环状加内部点状注水方式开采。

本文研究的垦 71 断块馆 4 段为曲流河沉积,其微相分为如下的 4 类: I 类砂岩是边滩和河道; II 类砂岩包括天然岸, III 类砂岩是决口扇; IV 类是泛滥平原,为泥岩。如果把边滩和河道、天然堤和决口扇,都归为砂岩,油藏建模的问题就归纳为砂岩、泥岩两种岩相的空间分布问题了。

## 2 三维地震数据的质量控制研究

三维地震数据的质量如何是决定在地震数据和测井数据相结合条件下,进行油藏建模的一个关键因素。对于本文的研究区域的所涉及层位馆 4 段,实际数据显示,三维泥质含量反演数据显示的砂体分布,和自然电位测井数据的负异常的砂体显示的对应关系较好(图 1),这说明了在研究区的三维地震数据的时深转换是比较好的,从而提供了地震数据、和测井数据相互结合的基础。图 1 是通过研究区内 5 口井的一个剖面图。三维地震数据是经过反演得到的泥质含量。其中,红色为河道,是砂体最发育的地方,蓝色、浅蓝代表泥岩,黄色、绿色,则是代表堤岸、决口扇和边滩。它们是从砂岩到泥岩过渡的中间地带。图 1 中的各口井处的地震数据红色、黄色的地方,对应着各井相应自然电位曲线的负异常。因此,三维地震

数据和测井数据的对应关系是很好的,也可以说地震数据的质量较好。在研究区域的其他地方,所显示的井震关系也是同样的情况。

## 3 多点统计建模与训练图象的制作

传统的油藏建模技术是利用简单的两点统计学,以表达具有复杂的几何结构的地质现象。近年来,多点统计建模的应用已经越来越受到重视。它摆脱了两点统计学这种局限性,有利于对复杂的地质特点和连通性的建模。这种建模方法不仅可以在数百万个网格的模型内有效地运行,并且还可以借助测井、地震、和概率数据等多种信息的融合算法,使其功能得以进一步延伸。

在储层建模过程中,为了保证数据条件化的灵活性,以便再现弯曲复杂的沉积相结构,多点地质统计学建模能够从训练图像中捕获沉积相结构,并把它们条件化到特定油藏的观测数据,或称为“锚定”到特定油藏的观测数据。训练图像是对先验地质模型的一种量化。它包含了真实储层中所存在的,沉积相的空间结构及其相互关系。从本质上讲,训练图像纯粹是概念性的,简单的手工绘画或计算机工具都可以用来生成不同的训练图像。通过训练图像把地质先验认识和概念模型引入到储层建模中来,是多点统计建模方法对储层建模的一个突出贡献。借助于露头类比,岩心分析,测井解释,和地震图像等,地质学家和储层建模人员可以得到储层沉积相结构和空间相关性的先验认识,然后以训练图像的形式指导井间沉积相预测。

和二点统计建模方法中的变异函数类似,在多点统计建模方法的训练图像是地质概念模型的数值表

达,是根据研究区的地质特点,而生成的二维、或三维沉积相的空间分布图。它能够提供更关于油藏架构的先验信息。

训练图像是地质建模人员在综合了各种类型数据(井位、测井、地震等)的解释并结合自己的经验、认识的基础上得出的。多点统计模拟将建模人员大脑中想要得到的相带空间分布样式直观地通过训练图像表达出来。这种“所见即所得”的建模原则是两点统计和基于目标的建模方法所没有的,也是多点模拟受到广泛欢迎的主要原因。

为了绘制馆4段的三维训练图像,综合参考了相应小层砂体厚度分布图,沉积微相分布图,和砂体纵向比例曲线。前两种图能够反映出小层中砂体分布在横向上的变化,第三种图可以反映纵向的变化。根据对砂体横向、纵向的粗略描述,可以自上至下的一片、一片地来绘制砂体的分布图。把如此获得的30片合并在一起,就构成了馆4段砂体分布对应的,三维空间中的一个训练图像了。其中,砂体厚度分布图,是根据测井数据加以统计后,绘出的等值线图。而沉积微相分布图,是根据沉积学的认识,手工绘出的平面图。

砂体纵向比例曲线,是根据每一个沿层切面的砂体占的百分比,绘成的以纵向坐标为纵轴的一条曲线。图2是研究区馆4段的由120口井的测井数据算得的纵向比例曲线。图2中,红色代表砂岩的比例,蓝色代表的是泥岩的比例。可见,在馆4段中,其上部的砂岩比较少,而其下部的砂岩比较多。

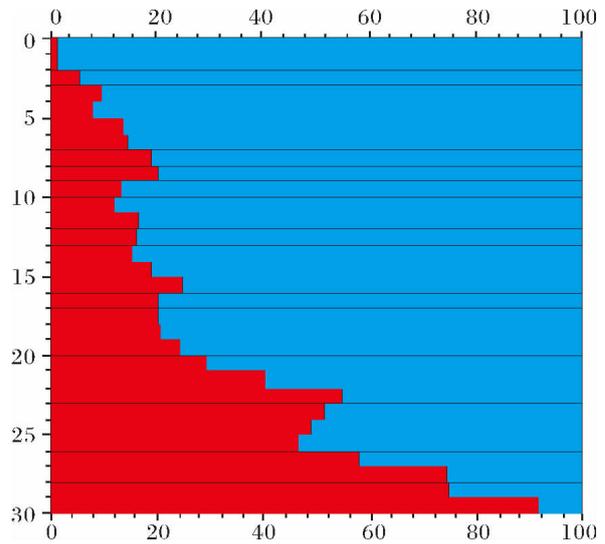


图2 由测井数据计算得到的纵向比例曲线  
Fig.2 Vertical proportion curve obtained by logging data

鉴于馆4段的平均层厚约为60 m,它含的10个小层平均厚度为4 m。2 m以上储层占到区块储层的90%以上。综合三维地震分辨率能力及地质需求,确定每1片的厚度为2 m,训练图像数据体也要相应地分为30片,这样就可以基本反映纵向上的储层非均质性(图2)。

#### 4 软硬数据结合方法与影响比

本项目采用软硬数据结合的方法,利用地震数据,对于利用测井数据所建立的地质模型<sup>[13,14]</sup>进行约束。硬数据一般是指,比较精确的,但其数量比较

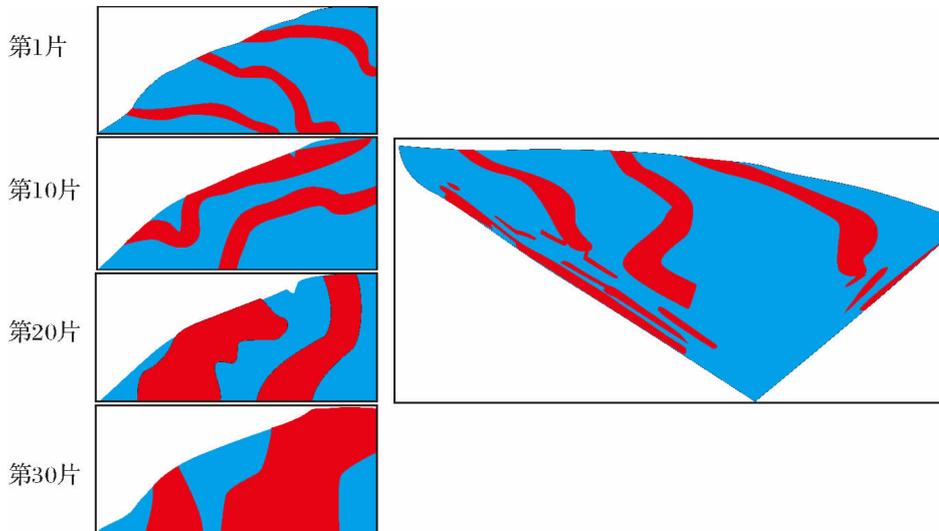


图3 训练图像的三维显示(右侧)及其分片显示(左侧)  
Fig.3 3D display(right side) and 2D display(left side) for training image

少的数据。在这里 硬数据就是测井数据。然而 软数据是指精确度比较差的,但是数量却比较多的数据。这里 软数据就是地震数据。

针对测井数据和地震数据相互结合为背景,Journal 教授在 2002 年发表的论文<sup>[13]</sup>研究了,在给定两种不同来源的数据事件 B 和 C 的条件下,利用条件概率  $P(A|B,C)$  解决未知参数 A 的估计问题。在这里,数据 A, B, C 能够在多个空间位置处取值,而且 B, C 分别代表测井数据和地震数据。然而, A 则是以测井数据和地震数据为约束条件的一个未知参数,它是不能够直接观测得到的,将会被模拟的数据。假设  $P(A|B)$  和  $P(A|C)$  等两个条件概率都可以被估计得到。这里的挑战是, B 和 C 作为不同来源的数据,要求并不独立。如果两者相互独立,则问题就可以利用贝叶斯定理容易地得到解决。

$P(A|B,C)$  可以用于事件 A 的估计或者模拟。在两种数据之间的相关性存在的情况下,传统的条件独立的假设下的结合算法呈现为不稳健的,会导致各种不一致性的出现。对此,Journal 教授的论文提出了“更新比”(Updating Ratios)的概念。在复杂的数据相互依赖存在的情况下,这个概念保证了所有概率条件的作用。这个“更新比”的概念,就是本文所用到“影响比”的概念。

影响比是运行软硬数据结合算法时必须确定的一个参数。它确定了地震数据对于模拟结果的影响,和测井数据对于模拟结果两者的影响之比。它提供了一个选择,是地震数据的影响大,还是测井数据的影响大。

在本文采取的算法中,影响比是利用 2 个整数的比值表示,如 L:S。L 代表测井数据的影响,其取值为 1, 2, 3。S 则代表地震数据的影响,其取值也为 1, 2, 3。本文为了突出地震数据对井间砂体预测的作用,所采取的影响比为 1:3。这里,测井数据的影响取为 1,地震数据的影响取为 3。这样预测的结果,地震数据的影响明显大于测井数据的影响。当需要考察井中的测井数据的作用,需要突出测井数据时,就应该采用 3:1。当无法确定应该突出测井,还是突出地震时,影响比就可以取为 1:1,或为 3:3。当然,测井数据的影响比也可以为 2,地震数据的影响比可以为 2。

具体算法包括如下的三种数据: A, B, C。

利用贝叶斯公式,在 A, B 为条件互相独立时,可以有:

$$P(A|B) = \frac{P(A, B)}{P(B)} = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B|A)P(A) + P(B|\bar{A})P(\bar{A})} \quad (1)$$

在上式中,利用 A|C 代替 A,于是得到:

$$P(A|B, C) = \frac{P(B|A)P(A|C)}{P(B|A)P(A|C) + P(B|\bar{A})P(\bar{A}|C)} = \frac{P(A|B)P(A|C)[1 - P(A)]}{P(A|B)P(A|C)[1 - P(A)] + [1 - P(A|B)][1 - P(A|C)]P(A)} \in [0, 1] \quad (2)$$

把被估计的数据 A 的条件概率记为  $P(A|B, C)$ ,就是以硬数据 B(测井数据),软数据 C(地震数据)两者为条件下,进行模拟所得到的参数 A 的条件概率。

然而,式(2)中的  $P(A|B)$  就是利用多点统计建模方法获得的在空间一点的成为砂岩的概率。式(1)中的  $P(A|B)$  作为地质信息,可以从训练图像获得。 $P(A|C)$  是地震信息导出的概率。 $P(A)$  是先验概率,即为预先确定的砂岩的概率,即目标的砂泥比。

对于各个条件互相不是独立时,Journal<sup>[14]</sup>引入固定更新比的概念,把  $P(A|B, C)$  表示成如下形式:

$$P(A|B, C) = \frac{1}{1+x} \in [0, 1] \quad (3)$$

其中

$$x = \frac{1 - P(A|B, C)}{P(A|B, C)}$$

利用参数  $\tau_1$  和  $\tau_2$ ,可以定义:

$$\frac{x}{b} = \left(\frac{b}{a}\right)^{\tau_1} \left(\frac{c}{a}\right)^{\tau_2}$$

其中:

$$a = \frac{1 - P(A)}{P(A)}; \quad b = \frac{1 - P(A|B)}{P(A|B)};$$

$$c = \frac{1 - P(A|C)}{P(A|C)};$$

当  $\tau_1 = \tau_2 = 1$  时, (3) 式的左段(各条件不独立时的  $P(A|B, C)$ ) 就等于 (2) 式的左端(各条件独立时的  $P(A|B, C)$ )。这表明 (2) 式中的  $P(A|B, C)$  是 (3) 式中的  $P(A|B, C)$  的一个特例。这即说明在更新比中的测井数据的影响为 1,同时地震数据的影响为 1 时,那么当条件不独立时的  $P(A|B, C)$  就会等于条件独立时的  $P(A|B, C)$ 。

由于多点统计建模方法 软硬数据结合方法较为复杂,它们的输入数据也较多,需要对它们的输入、输出关系用简明的方法加以表达(图 3)。

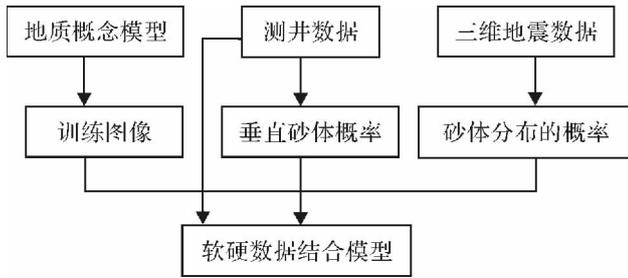


图4 多点统计建模需要输入参数选择的方框图

Fig. 4 Block diagram for input selection for multi-point statistical modeling

## 5 砂体概率生成曲线和纵向比例曲线

软硬数据结合的算法需要确定三维空间砂体概率分布。利用砂体概率生成曲线,可以把泥质含量反演数据转化为砂体空间分布概率,以便为测井、地震结合的软硬数据结合模型中应用。这种曲线是把三维地震反演数据转化为砂体空间概率分布的一项重要参数。它的取值的不同,会导致砂体在空间中分布的概率大小的变化。这是把测井数据和地震数据结合,所用软硬数据结合模型所必须有的参数。

经过不同的砂体概率生成曲线计算结果的对比,确定使用如下的这条砂体概率生成曲线。利用这条曲线,当三维泥质含量反演得到的泥质含量小于20%时,砂体概率为1。当这个泥质含量从20%到80%变化时,所对应的砂体概率就从100%线性下降为0%。然而,当泥质含量从80%到100%时,砂体概率为0%(图5)。

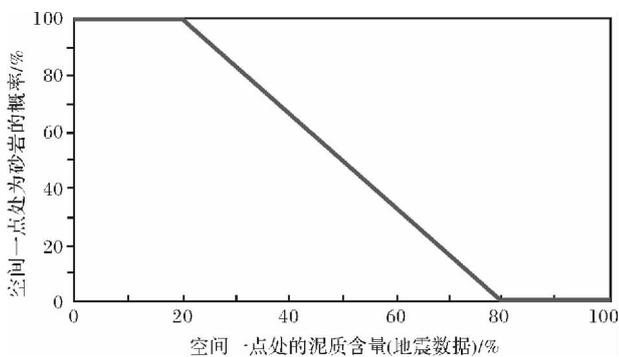


图5 砂体概率生成曲线

Fig. 5 Curve for sand body probability making

## 6 井间砂体预测结果分析

在建模过程中,随机种子所引起的建模结果不确

定性,是必须考虑的。正确认识,尽可能地减少油气藏地质建模中所存在的这种不确定性,对于提高建模结果的合理性,克服建模结果应用的盲目性,是一件具有重要意义的事情。

油气藏地质建模所用的随机模拟方法,都是以蒙特卡罗方法为基础的。因此,在所有的地质建模软件系统中,设置了随机种子这个参数。众所周知,不同的随机种子对应于不同的建模结果。对于10个种子,就有10个建模的不同的结果;1000个,10000个种子,则对应于1000个,10000个结果。这些不同结果的地位都是平等的,哪一个也不比哪一个好。因此,它们是等概率的。利用专业人员的比喻,这些结果相当于有10000个地质学家独立做出来的结果。利用数学上的术语,这些建模的结果也称为“实现”。

对于任何一个单独的建模实现,是分析不出其不确定性的,也无法分析它的合理性、和准确性。只有对若干个实现,从总体上进行分析、对比,才能对其不确定性进行认识。

在研究区中,单纯利用测井数据,用5个不同的随机种子,获得了砂体空间分布的5个实现,也就是5个不同的建模结果。在图6顶部所显示的,是这5个实现通过k71-19, k71-14, k71-107, k71-53, k71-41, k71-108的5个剖面图。它们也称为测井砂体预测剖面图。其中,红色代表砂体,蓝色则代表泥岩。在图6、图7的最下部显示的泥质含量剖面图,代表了泥质含量反演的结果。其中,蓝色表示泥质含量最大,为100%。红色表示泥质含量为0%,为纯砂岩。从蓝色,经过浅蓝、绿色、浅黄色、桔黄色、一直到红色,相应的岩性则从泥岩、泥质砂岩、一直过渡到纯砂岩。

这个剖面是处于该研究区的井位最密集的区域。k71-41, k71-108两口井之间的间距为190m,是该剖面中最短井距。k71-107, k71-53两口井之间距离为480m,是该剖面中最长的。190m的井距明显地小于120口井的平均间距。

图7则是利用测井数据和地震数据,通过上述的软硬数据结合的算法,获得的砂体空间分布的5个实现。利用这些实现,通过上述7口井可以作出的5个井震砂体预测剖面图。

以下通过对利用测井砂体预测剖面图、井震砂体预测剖面图、和地震泥质含量剖面图进行综合对比,进行井间砂体预测分析,及其不确定性的分析。

在对比、分析的过程中,图6,图7的最下部所共

有的那张地震泥质含量剖面图,是由泥质含量反演所得的地震数据直接生成的,可以视为对比、分析的最客观的图件。

砂岩预测的不确定性分析、对比,分为三个不同的方面:①测井砂体预测剖面图、井震砂体预测剖面图和地震泥质含量剖面图的对比;②两种砂体预测剖面图的不同井及其周围地区的砂泥岩分布的对比;③不同随机种子产生的多个测井砂体预测剖面图之间、和多个井震砂体预测剖面图之间分别对比。

首先,图 6 显示的 5 个砂体预测剖面的储层上部的砂岩明显存在,其厚度和延伸长度都有相当的规模,包括在靠近顶界的局部。然而,井震砂体预测剖

面图显示出储层上部只含有少量的砂体,大部分都是泥岩。再者,从地震泥质含量剖面图来看,储层上部基本上是蓝色,及少量的绿色。相比之下,图 7 的剖面图的层段上部出现砂岩明显要少,而且和地震泥质含量剖面图出现的砂体也比较符合,而图 6 出现了不少不该出现的砂体。这是由于测井砂体预测图含有不确定性所造成的。因此,地震砂体预测图的不确定性明显小于测井砂体预测图。

在图 6 中 k71-19 k71-14 的附近,储层的上部呈现了较厚的砂体。k71-14 井和 k71-108 井之间所出现的砂体厚度达 10 m 在 k71-107 井两侧的砂体厚度达 3~4 m。然而,在这些局部,对于地震泥质含量剖

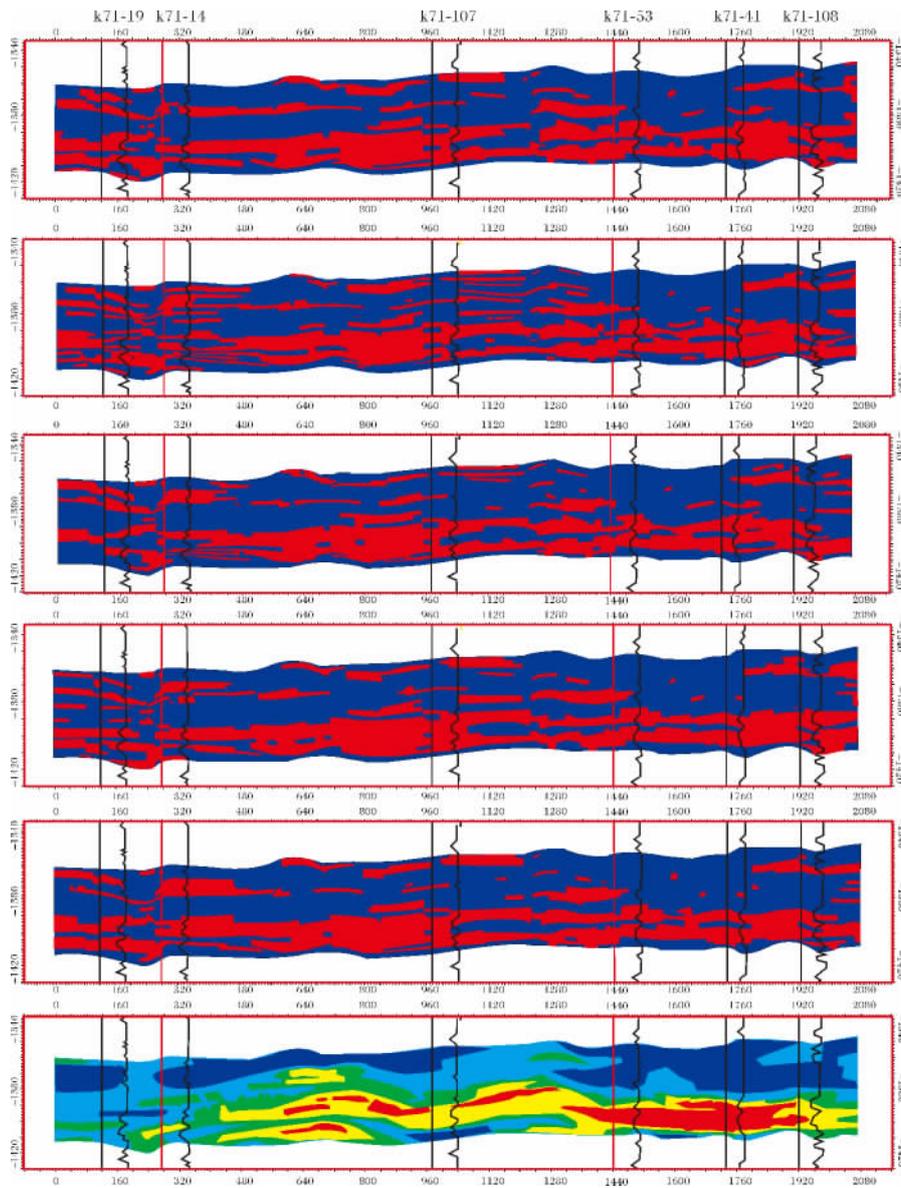


图 6 利用测井数据作出的砂体预测图和地震泥质含量图的对比

Fig. 6 Comparison between sand predictions by logging data and shale content by seismic data

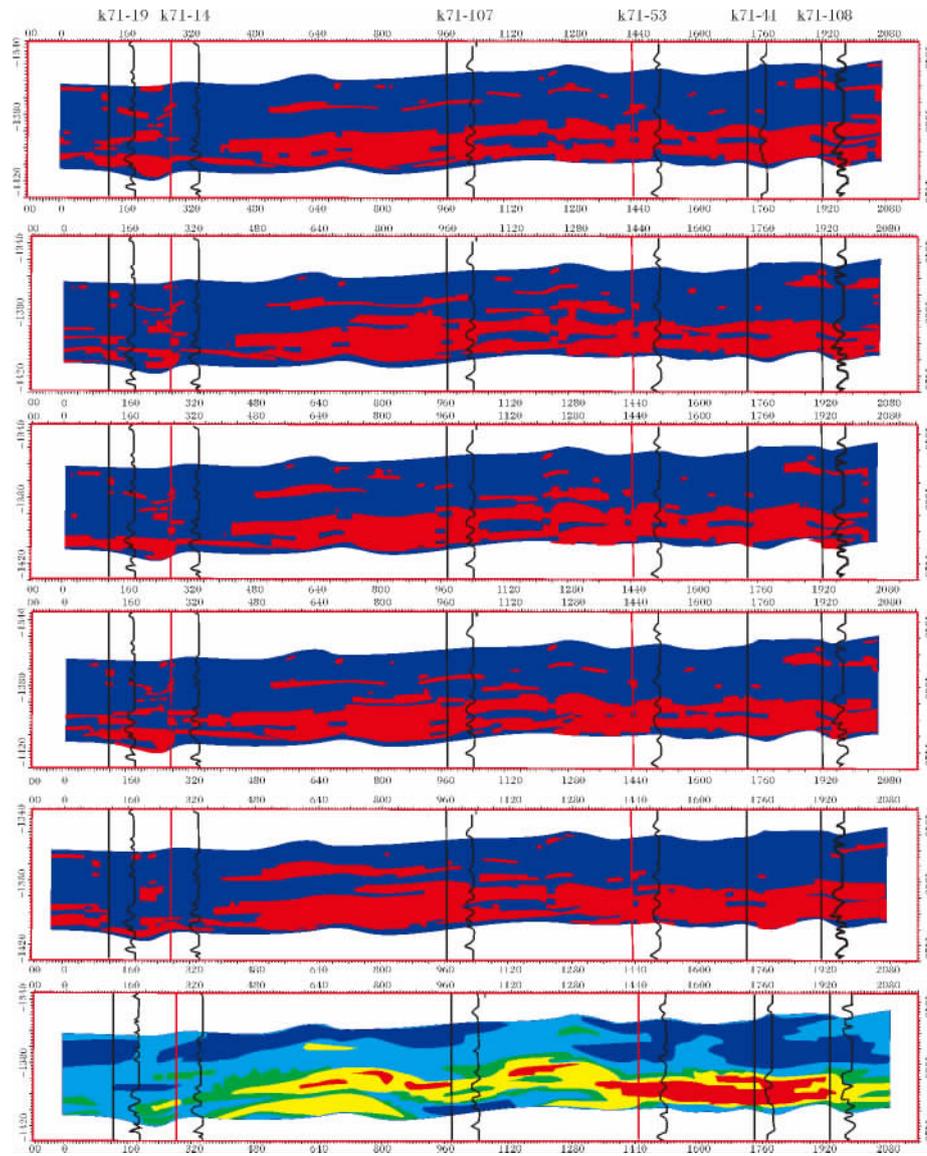


图7 利用测井和地震数据结合作出的砂体预测图和地震泥质含量图的对比

Fig. 7 Comparison between sand predictions by logging data with seismic data and shale content by seismic data

面图,呈现的都是蓝色、和浅蓝色,也就是泥岩。对于k71-107的附近,对比的结果也是类似的。因此说,测井砂体预测剖面图和泥质含量剖面图的差别是比较明显的。然而,在图7中的k71-19、k71-14和k71-107的附近,储层的顶部没有呈现了较多的砂体。这点是和地震泥质含量剖面图是一致的。因此,再一次说明了井震砂体预测剖面图比较可信,具有较小的不确定性。最后,对比是针对建模结果的不确定性分析的。图6中的5个测井砂体预测剖面图,显示的砂体的位置之间是有明显差别的,特别是在储层的顶部。这种差别是由于不同的随机种子所引起的。然而,图7中的5个井震砂体预测剖面图,

则基本一致。这说明了井震结合的建模结果的不确定性明显地比较小。

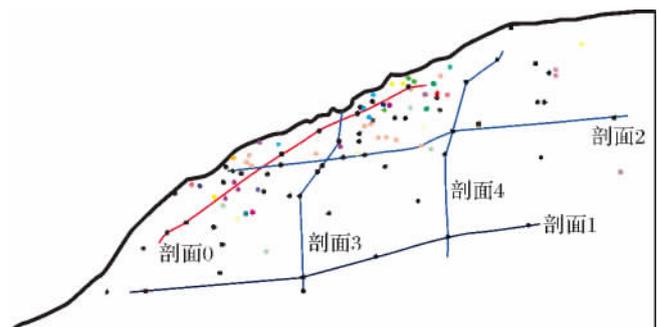


图8 五个剖面的位置

Fig. 8 Positions of 5 cross sections

图 8 中, 剖面 0 是指图 6、图 7 的剖面。在这张图中, 也标出了剖面 1、剖面 2、剖面 3、剖面 4, 它们是利用研究区的数据做出的四个剖面。其中, 两个剖面是东西方向的, 另外两个是南北方向的。对于这四个剖面, 分别取得了三个建模的实现, 分别称为实现 1、实现 2、实现 3, 并绘制了剖面图( 图 9、图 10、图 11、图

12)。综合分析这 5 个剖面, 可以看出, 在馆 4 段的下部, 存在稳定、连续的砂岩。它们具有较长水平长度( 最长可达 2 600 m), 和较大的厚度( 最厚可达 30 m)。在其上部的建模结果中, 则主要显为泥岩, 还有少量的薄层砂岩。与图 6 中的仅利用测井数据的建模结果相比, 井震结合建模结果大大地降低了建模

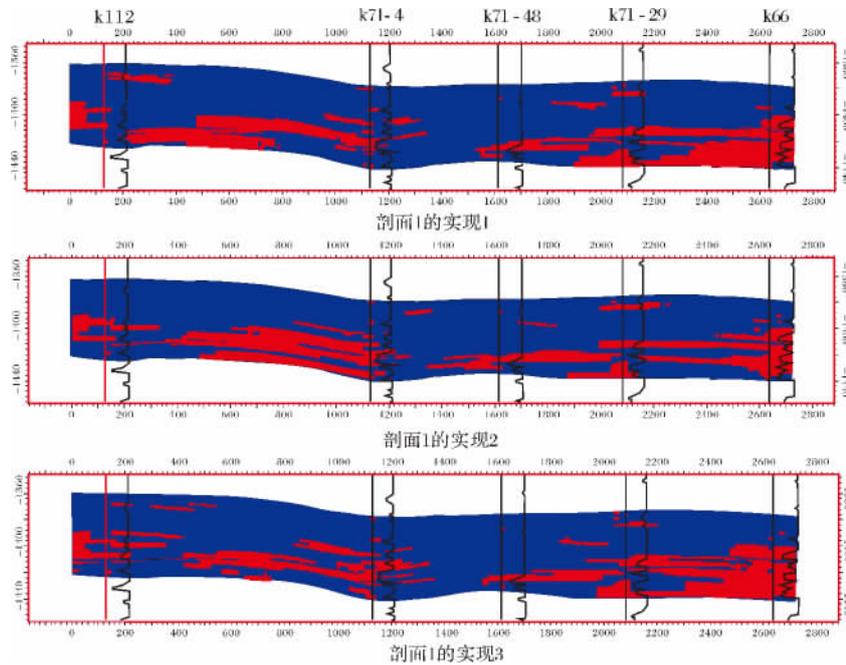


图 9 剖面 1 的 3 个实现  
Fig.9 3 realizations of cross section 1

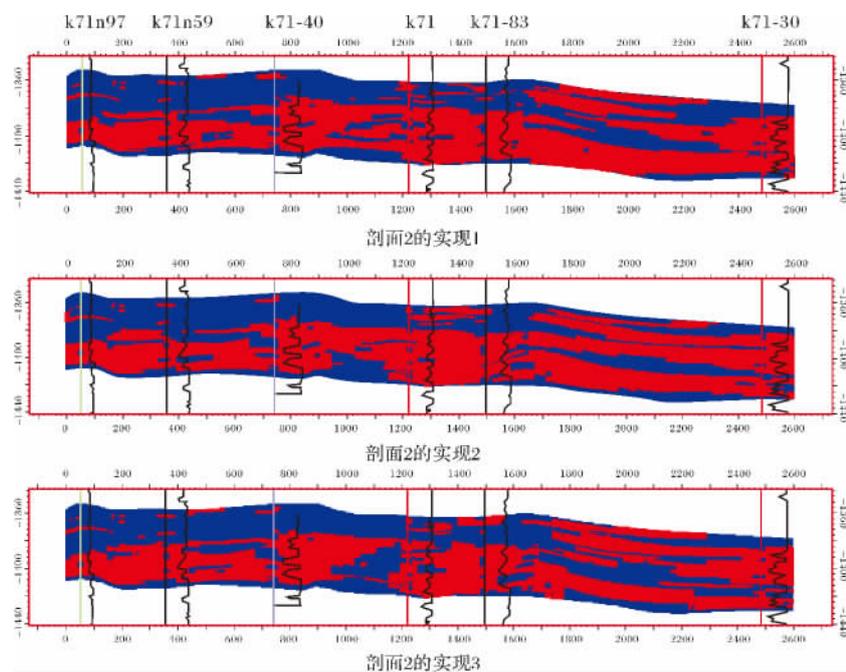


图 10 剖面 2 的 3 个实现  
Fig.10 3 realizations of cross section 2

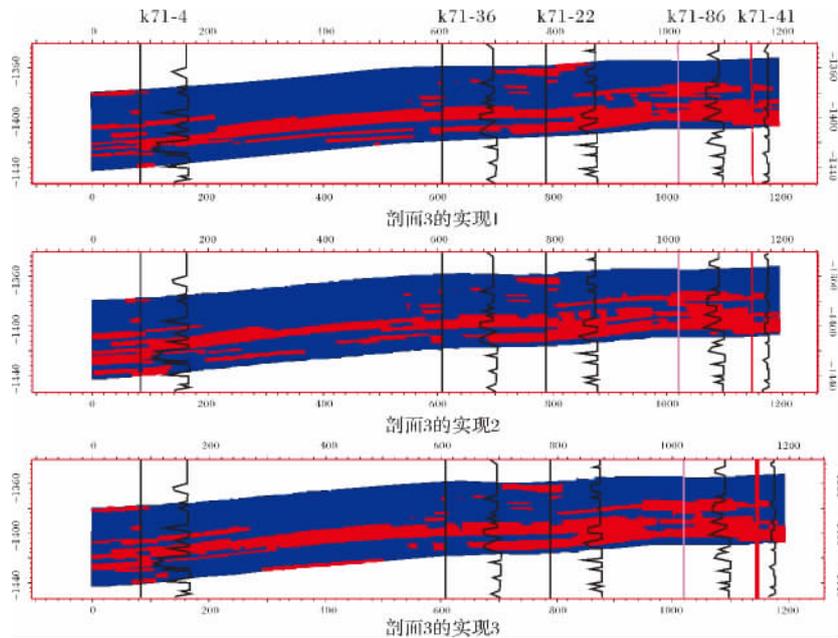


图11 剖面3的3个实现

Fig. 11 3 realizations of cross section 3

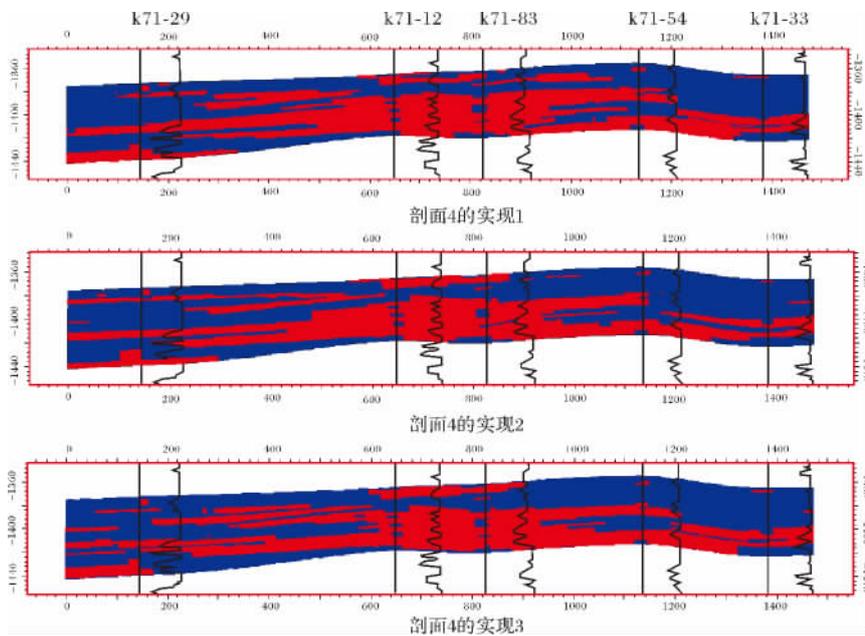


图12 剖面4的3个实现

Fig. 12 3 realizations of cross section 4

的不确定性。

作为建模结果,砂体分布特征的这些认识,指出了砂体存在的具体坐标,包括起止的水平位置、深度、具体的厚度,描述了各个砂体具体的形态。为研究区的进一步开发,这些砂体连续性分布的特征提供了有关流体流动的详细、准确、具体的信息。在有关的地

质认识精确化的基础上,将由测井数据计算得到的纵向比例曲线(图2)提供的砂体分布的统计特征,更加准确、更加具体化了。

总之,井震预测砂体剖面图是比较接近于地震泥质含量剖面图,它综合了地震和测井两个方面的信息,且明显地优越于图6中的测井砂体预测剖面图。

## 7 结论

本文通过具体、明确的算法研究, 和实际油田数据的计算, 对于测井数据和地震数据结合的多点统计建模的结果, 和单纯利用测井数据的建模结果进行了对比和分析。上述结果及其分析, 说明了前者的结果在井间砂体预测上的独突的作用, 而且在预测砂体的纵向分析、横向分布、泥质夹层的位置, 及其不确定性分析等四个方面具有明显的意义。这个结果对于油藏建模工作具有十分重要的影响, 进一步证明了地震数据约束在油藏建模中的必要性。

利用这些通过井震结合生成的砂体空间分布的多个实现, 及其利用它们的控制作用, 可以模拟出来的孔隙度、渗透率、含油饱和度等物性参数的空间分布的多个实现。利用这些孔渗饱的多个实现, 可以完成油气田开发中的各种工作。例如计算油藏的油气概率储量, 进行井位的优化, 最常用的是进行油藏数值模拟。譬如, 进行多次油藏数值模拟, 所获取的产油量、出水量等多个模拟结果, 和仅用测井数据得出的结果相比, 其不确定性会明显的降低。显然, 这是由于降低了砂体分布的不确定性的一个直接效果。

对于开发中后期的油气田, 井位的密度已经相当的密集, 井距已经达到 100 m ~ 200 m。如果仅仅利用测井数据, 油藏的建模的不确定性仍然会相当大, 不能全部控制井间砂体分布的变化。对于这样的油气田, 地震数据参与油藏建模是十分必要的。这充分说明了本文结果的意义和价值。

我国的储层地质建模技术有着自身的特点。其中, 著名学者裘怿楠教授早在 1991 就全面地阐述了储层地质模型的基本概念和建模的基本方法<sup>[15]</sup>。地震方法在油田开发中的应用也已经取得长足的进步<sup>[16]</sup>。以地质统计学为基础的地震数据建模方法, 经历了二十多年的发展历程, 初步形成了相应的理论体系。在这个过程中, 由于地震数据的参与, 地质统计学的理论和应用的不断发展, 出现了地震、测井数据的结合, 地质统计学反演, 贝叶斯方法的引入等全新的方法。同时, 地震建模方法导致的油藏工程的进步, 也是多方面的: 加密井位置的选取, 注水的优化, 历史拟合效果的改善, 水平井数据的建模, 油藏数值模拟, 裂缝的描述, 井间地震数据的应用, 统计岩石物理学的研究, 等等。

致谢 衷心感谢中石化胜利油田分公司物探研究院的正确领导和大力支持, 衷心感谢杨宏伟, 夏建,

吕德灵, 高寿涛, 钱志等高级工程师的大力协助。衷心感谢中国石油勘探开发研究院裘怿楠教授对本文提出的宝贵建议, 特别感谢施伦贝谢公司道尔研究中心张团锋博士的宝贵建议。同时, 感谢西安石油大学计算机学院的同事潘少伟博士, 和硕士研究生吴建祥, 李桂亮, 王孝超、陈涛等的有关工作。

## 参考文献(References)

- 1 Doyen M P. Seismic Reservoir Characterization: An Earth Modeling Perspective, Education Tour Series, EAGE, 2007
- 2 Bortoli L J, Alabert F, Haas A, *et al.* Constraining stochastic Images to Seismic Data [M], Troia: International Geostatistics Congress, 1992
- 3 Haas A, Dubrule O. Geostatistical inversion: A sequential method of stochastic reservoir modeling constrained by seismic data [J]. First Break, 1994, 13(12): 561-566
- 4 Dubrule O, Geostatistics for seismic data integration in earth models, SEG/EAGE distinguished instructor short course No. 6, 2003
- 5 Journel A G. Geostatistics: roadblocks and challenges, Soares, A., Geostatistics-Troia, Dordrecht: Kluwer Academic, 1992, 1: 475-489
- 6 Guardiano F, Srivastava R M. Multivariate geostatistics: beyond bivariate moments. Soares, A., Geostatistics-Troia, Dordrecht: Kluwer Academic, 1993, 1: 133-144
- 7 Strebelle S. Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics [J]. Mathematical Geology, 2002, 34: 1-22
- 8 Journel A G, Zhang T. The necessity of a prior multiple-point model, Mathematical Geology, 2006, 38(5): 591-610
- 9 Yuhong Liu, Andrew Harding, William Abriel, *et al.* Multi-point simulation integration wells, three-dimensional seismic data, and geology [J]. AAPG-Bulletin, 2004, 88, 905-921
- 10 T. Zhang, D. McCormick, N. Hurley, *et al.* Applying multiple-point geostatistics to reservoir modeling—a practical perspective [J]. Petroleum Geostatistics, 10-14, September, 2007, Cascais, Portugal
- 11 Zhang Tuanfeng. Numerical Modeling of Heterogeneous Carbonates and Multi-Scale Dynamics [C]. SPWLA 50th Annual Logging Symposium, June 21-24, 2009, The Woodlands, Texas
- 12 Zhang T, *et al.* An Integrated Multi-point Statistics Modeling Workflow Driven by Quantification of Comprehensive Analogue Database [C]. 73rd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011 Vienna, Austria, May 23-26, 2011
- 13 Journel A G. Combining Knowledge From Diverse Sources: An Alternative to Traditional Data Independence Hypotheses [J]. Mathematical Geology, 2002, 34(5): 573-596
- 14 Henning M. Bayesian Kriging—Merging observation and qualified guesses in Kriging [J]. Mathematical Geology, 1987, 19(1): 25-39
- 15 裘怿楠. 储层地质模型 [J]. 石油学报, 1991, 12(4): 55-62 [ Qiu Yinan. Geological models of petroleum reservoir [J]. Acta petrolei sinica, 1991, 12(4): 55-62]
- 16 李阳. 油藏综合地球物理技术研究进展 [A]. 中国地球物理学会

第22届年会论文集[C], 2006

## Multi-point Statistical Modeling Constrained by 3D Seismic Data— Reducing of Uncertainty of Sand Body Prediction

WANG Jia-hua<sup>1</sup> XIA Ji-zhuang<sup>2</sup>

(1. School of Computer Sciences, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065;

2. Geophysical Prospecting Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015)

**Abstract:** A study of reservoir modeling is present with 3D seismic and logging data by applying of multi-point statistical modeling, and by the combination of seismic and logging data. The results indicate that the combination of seismic and logging data can reduce uncertainty of reservoir modeling. The study includes the quality control of seismic data, the combination of soft and hard data, the application of multi-point modeling, the making of training image, and the selection of curves for sand body probability making. At last, the result obtained by the combination of 3D seismic and logging data makes a contrast with the result by only logging data. Seismic shale content cross sections are used as a criterion for these analysis and contrast, which include 3 levels: ① contrast of distributions of sand and shale for upper part and low part of the reservoir, ② contrast of distributions of sand and shale for different wells and their neighboring areas, ③ contrast of among well logging sand prediction cross sections, and both well logging and seismic sand prediction cross sections, produced by different random seeds. As a result of this paper, multi-point statistical modeling constrained by 3D seismic data obviously increases reasonableness of sand prediction inter-wells, and reduces uncertainty of reservoir modeling.

**Key Words:** reservoir modeling; seismic data; logging data; multi-point statistical modeling; training image; curves for sand body probability making