

随机建模技术在碳酸盐岩储层中的应用

林庆富¹, 马颖忆²

(1. 中国石油化工股份有限公司石油物探技术研究院, 江苏 南京 211103;

2. 金陵科技学院建筑工程学院, 江苏 南京 211169)

摘要: 储层随机建模技术在碎屑岩储层中的应用较为广泛,而在碳酸盐岩储层中的应用则相对较少。针对建模工区面积大、钻井资料不足、地震解释资料不全、相控约束缺少、气水界面复杂等困难,提出了相应的解决方法,即属性模拟过程中利用储层厚度反演资料作为平面约束,两个气田采用不同的相关系数约束,储量计算中应用变气水界面。建模结果表明,目标碳酸盐岩工区的构造模型和属性模型的误差精度满足油藏描述需要,储量计算结果与传统容积法计算结果相当,可作为这类地质建模的一个参考。

关键词: 储层; 建模; 碳酸盐岩储层; 变气水界面

中图分类号: TE155

文献标识码: A

文章编号: 1672-755X(2020)02-0041-06

Application of Stochastic Simulation Technique in Carbonate Reservoir

LIN Qing-fu¹, MA Ying-yi²

(1. SINOPEC Geophysical Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: Stochastic simulation technique is always widely applied in clastic rock reservoir, but relatively few in carbonate reservoir. Facing many difficulties, such as large modeling area, limited interpretation data, no facies controlling and complex gas-water-contact, this paper proposes a proper solution to all problems mentioned above. Firstly, the inversion result of reservoir thickness is used as 2D restraint during property modeling. Secondly, different correlation coefficient is given in two different gas fields. Thirdly, variable gas-water-contact is generated in gas reserve calculation. The result shows that error precision of geological modeling fulfills requirements in reservoir description, and gas reserve calculation result is close to traditional volume calculation. The paper can provide a reference to similar geological modeling in carbonate reservoir.

Key words: reservoir; modeling; carbonate reservoir; variable gas-water-contact

近年来,应用于储层建模的地质统计学、构造建模、属性建模等的研究日益进步,同时软件信息技术在三维可视化、大规模数据处理和并行计算等方面取得长足进展,计算机性能也不断提升,研究人员发展出一套以地质统计学为核心的地质模型建立方法和三维储层建模软件。在油气藏评价乃至油气田开发的不同阶段均可建立三维储层地质模型,对油气储层分布及其含油气特征进行直观分析。

储层建模主要是利用建模目标工区已有的钻测井资料,结合地震构造解释成果,在地震数据和地质规律的约束下,首先建立能够反映目标工区地质规律的地质构造模型。利用测井数据中的岩相数据,孔隙

收稿日期: 2019-12-24

作者简介: 林庆富(1985—),男,河北唐山人,工程师,硕士,主要从事地质建模、地震勘探软件等研究。

度、饱和度、渗透率等物性数据,通过地质统计学方法,将分辨率高的测井数据粗化到建模要求的网格精度上,之后选择适合的地质统计学方法和参数,通过数据内插、外推得出井点间至全工区的所有三维网格上岩性及物性结果,从而建立起岩相模型和属性模型,以此开展油藏描述工作。

1 储层建模概述

储层建模技术的核心是地质统计学,储层建模技术能够把地震、地质、钻井、测井、储层反演、生产动态等方面数据结合起来,这种多类数据的相互融合校正可以提高建模精度。储层建模方法通常分为确定性建模和随机建模两大类,每一个大类涵盖不同的方法^[1-4],针对不同的油气储层建模研究,不同的方法既可以单独使用,也可以互相结合。

确定性建模是对井间未知区给出确定性的预测结果,即从已知确定性资料的控制点(如井点)出发,推测出点间(如井间)确定的、唯一的和真实的储层参数。目前,常用的确定性建模有储层地震方法、储层沉积学方法和克里格方法^[1,3-4]。

随机建模是指以已知的信息为基础,以随机函数为理论,应用随机模拟方法,产生可选的、等概率的储层模型方法。目前常用的随机模拟方法多以象元为模拟单元,主要有高斯随机域模拟、截断高斯随机域模拟、指示模拟、马尔柯夫随机域模拟、二点直方图法的随机模拟和分形随机域模拟等。

2 储层建模方法的选择

2.1 目标工区的情况

目标建模工区由 Y 气田和 C 气田两个气田构成,均处于开发前期,面积 477 km²,共有钻井 14 口,多数钻井解释含气。其中 Y 气田面积为 272 km²,有钻井 8 口;C 气田面积为 205 km²,有钻井 6 口。整个建模工区共有 5 个小层,分别为 A、B、C、D 和 E,其中主力储层为 A 和 C,整套地层的平均厚度为 235 m。模型的平面网格步长为 100 m×100 m,垂向网格步长为 0.5 m。

2.2 建模方法的确定

油气藏建模的核心问题是如何利用现有的井上资料预测井间属性分布,建立精确的三维地质模型。

根据已有的资料,本次建模采用确定性建模和随机建模相结合的方法。综合分析了工区内 14 口井反演储层厚度与井上平均孔隙度和平均含气饱和度关系,得出:随着储层厚度的增加,平均孔隙度和含气饱和度均有增加的趋势,反之较差。因此在建立物性模型的时候可利用储层厚度值来进行约束,体现确定性建模的特点。随机建模体现在孔隙度及含气饱和度建模的过程中,采用序贯高斯方法,形成若干个实现,分析各个实现的差别,选择能够反映储层特征的实现结果。

3 储层建模的思路和流程

本次建模充分借鉴其他碳酸盐岩储层建模研究工作^[5-7],强调地质概念模型对整个建模过程的控制作用,采用“两步建模”策略。第一步,从基础地质研究入手,进行构造分析,研究建模工区的断层、地层特点,建立符合地质认识和地质特征的三维构造模型;第二步,在概念模型的指导控制下,综合储层预测和地震反演成果作为约束条件,建立储层参数模型,实现确定性建模与随机性建模相结合,充分利用地震储层横向预测的优势,使建立的模型更符合地质实际,更可靠。流程细化如图 1 所示。

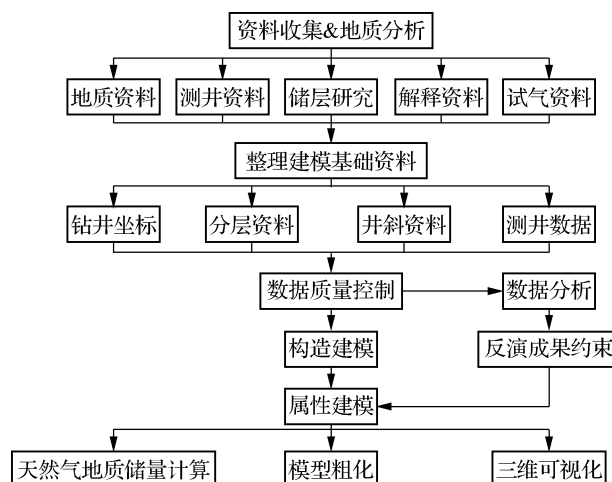


图 1 三维地质建模流程图

4 目标工区储层建模问题及解决方法

4.1 构造建模中合理利用有限基础数据

第一,合理利用断层成果。针对目标工区只有顶、底面的断层多边形的情况,建模过程中计算出断面空间展布,利用地震数据检查并修正断层位置,确定断层间交切关系,保证断层模型正确合理。

第二,结合地质特征充分利用地层解释成果。目标工区仅有顶层的深度域资料,前期收集的资料显示,建模工区 E 层位于气水界面以下且厚度巨大,可作为非储层处理。由此可将地震解释顶面复制并下移一个地层平均厚度,作为建模工区的底界,既保证层位完整又不影响储量计算结果。

第三,应用钻井地质分层建立地层模型。建模工区内仅有 14 口井,各个小层的厚度差别很大,采用常规的算法算出的小层构造顶面常发生交切或者重叠等错误现象。针对该问题,首先提取每层各口钻井的井上分层厚度形成各层等厚图,然后建立构造图。以图 2 所示的 CB-11 和 CB-2 连井剖面为检验,可见所建模型分层与井上分层一致性良好,断层交切关系正确,在其他连井剖面也可得出同样的结论。最终建立的构造模型如图 3 所示。

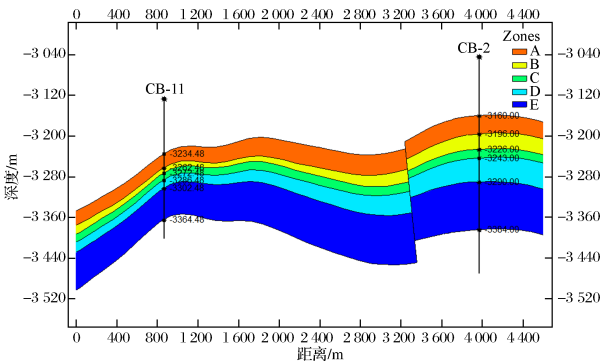


图 2 过 CB-11 和 CB-2 的剖面

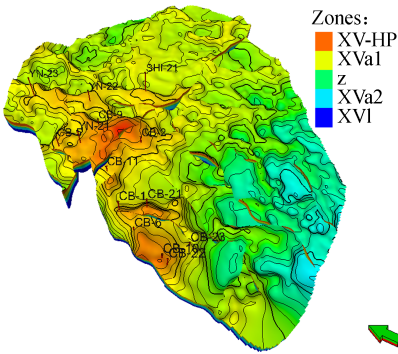


图 3 构造模型

4.2 属性建模过程中变差函数参数的选择和反演储层厚度资料的应用

目标建模工区为碳酸岩储层,其非均质性极强,综合考虑采用序贯高斯方法建立孔隙度模型和含气饱和度模型。其中,变差函数分析的参数选取是一个难点^[4]。由地质研究情况获悉,储层呈条带状分布,走向多为 NW—ES 向,变差函数分析过程以此作为主变程方向,与此垂直方向作为次方向,不断调整主次方向的步长、步长容限、角度容限和带宽等参数,得到了各向异性的变差函数模型。

建模工区中,物性模拟中采用不同的储层反演厚度约束的相关系数,即针对钻井数量多、研究相对充分的 Y 气田才采用较高的相关系数,C 气田则采用较低的相关系数,既充分应用了确定性资料,也兼顾了两个气田的不同特点。孔隙度模型和含气饱和度模型见图 4 和图 5。

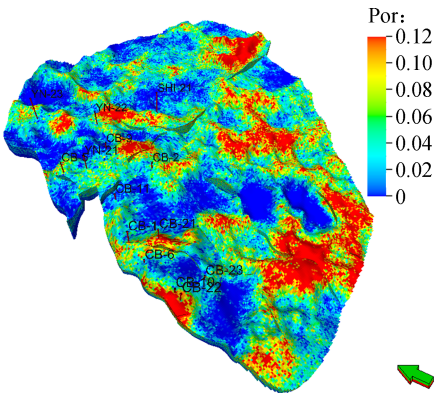


图 4 孔隙度模型

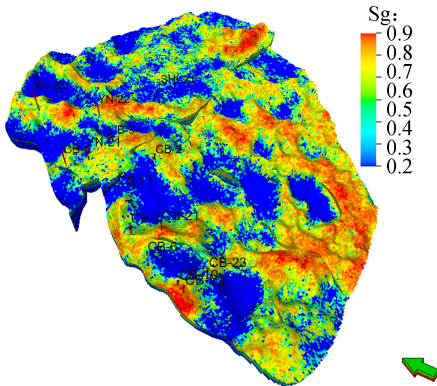


图 5 含气饱和度模型

4.3 多压力系统下气水界面的确定

井上资料显示,12 口井气水界面解释成果差异明显,最深和最浅结果差别在 100 m 以上。如果采用统一的气水界面处理,不能忠实于井上解释成果。因此,本次建模采用了变气水界面,具体的做法是将已有的 12 口井的气水界面解释成果以散点的形式采用克里格内插算法,计算一个层面作为气水界面,既能够在井上吻合气水界面解释结果,也能体现出多压力系统特点。典型的气藏剖面见图 6。

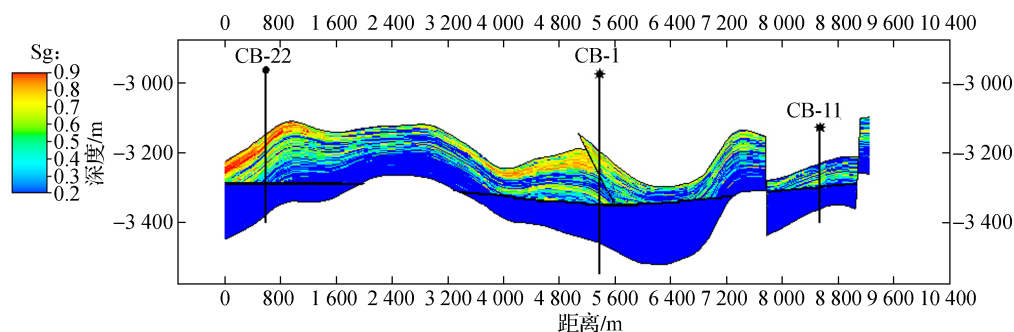


图 6 典型的气藏剖面

5 模型检验

5.1 孔隙度模型和含气饱和度模型的检验

将单井的测井成果曲线与建立的属性模型对比来检验模型结果在已知井上的准确性,结果如图 7 和表 1 所示。其中,图 7 为工区内随机抽取的三口井的对比情况,上边三幅图为孔隙度对比情况,下边三幅图为含气饱和度情况。以左侧 CB-2 井的孔隙度和含气饱和度为例,中间钻井位置曲线值高处对应模型的暖色调值,曲线值低处对应冷色调值,测井曲线数值与模型数值基本一致,且曲线高低变化幅度与模型颜色暖冷趋势一致,反映了 CB-2 井的孔隙度和饱和度模型模拟结果与测井结果具有较高的一致性,从而推理出验证模型的建立具有合理性和准确性。由此推及其余两口井的模拟结果,可得同样结论。

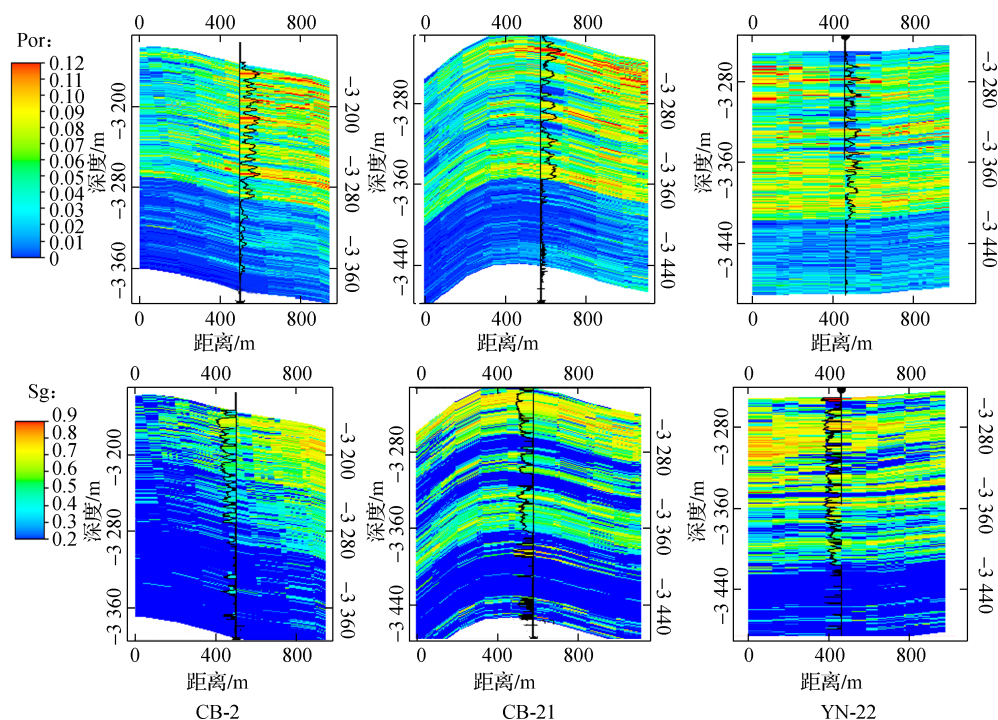


图 7 三口井井上检验结果

将井上的孔隙度和含气饱和度分别与模型上的孔隙度和含气饱和度作对比并统计整体误差(表 1)。结果表明,除 CB-11 和 SHI-21 两口井的孔隙度误差在 12%左右,其余 12 口井的误差均在 10%以内,占 14 口井的 85.7%,误差能够满足油气藏描述要求。井上含气饱和度的平均值和模型模拟的含气饱和度同样具有较高的一致性,除 CB-5 和 YN-21 两口井之外,其余 12 口井的误差结果均低于 10%,反映了模拟结果与钻井结果具有较高的统一性,也是随机建模技术能够很好地应用于储层建模从而进行油气储量预估的一个佐证。

表 1 模拟物性误差统计结果

井名	反演储层厚度/m	井上孔隙度平均值/%	模型孔隙度平均值/%	孔隙度误差/%	井上含气饱和度平均值/%	模型含气饱和度平均值/%	含气饱和度误差/%
CB-11	53.7	4.1	3.6	12.20	35.9	33.9	5.57
CB-6	71.1	5.1	4.9	3.92	39.9	40.3	1.00
CB-5	78.8	4.9	4.7	4.08	40.2	35.4	11.94
CB-2	79.1	5.4	5.5	1.85	30.6	32.3	5.56
CB-9	82.7	4.8	4.4	8.33	30.3	27.3	9.90
YN-22	86.2	5.0	4.6	8.00	40.4	37.6	6.93
YN-23	86.5	5.7	5.5	3.51	44.1	43.4	1.59
YN-21	89.4	5.1	5.3	3.92	45.4	40.5	10.79
CB-10	98.3	5.3	5.1	3.77	42.1	44.8	6.41
CB-23	98.8	5.9	5.9	0	44.5	40.1	9.89
CB-1	99.8	4.7	4.9	4.26	38.2	40.3	5.50
SHI-21	100.6	5.9	5.3	10.17	41.4	38.6	6.76
CB-22	131.8	5.7	6.1	7.02	45.4	41.6	8.37
CB-21	135.2	6.0	6.4	6.67	53.4	50.9	4.68

以储层厚度为自变量,通过散点图分析井上孔隙度和模型孔隙度,以及井上含气饱和度和模型含气饱和度的相关关系,如图 8 所示。结果表明,随着反演储层厚度的增加,井上孔隙度、含气饱和度和模型上的孔隙度和饱和度均表现为总体上升的趋势,这也证明了利用反演储层厚度作为建模确定性的约束条件具有合理性。

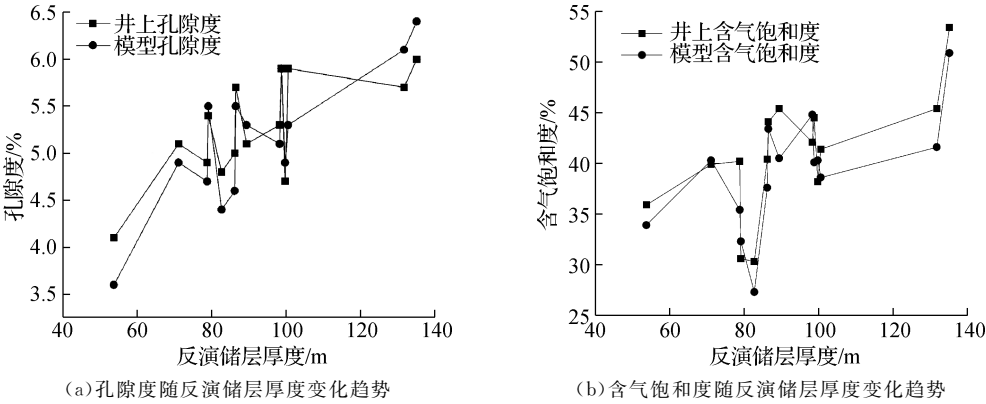


图 8 孔隙度和含气饱和度的变化

5.2 储量计算结果

设置用于储量计算的孔隙度下限为 3%,含气饱和度下限为 37%,利用变气水界面,分气田计算出天然气地质储量计算结果见表 2。其中,Y 气田模型计算的天然气储量为 $274 \times 10^8 \text{ m}^3$,小于传统容积法计算得到的储量,误差为 5.5%;C 气田模型计算的储量为 $324 \times 10^8 \text{ m}^3$,大于传统容积法计算得到的储量,误差为 6.2%;建模工区储量计算的合计结果,模型计算的出储量为 $598 \times 10^8 \text{ m}^3$,略大传统容积法计算得到的储量,误差仅为 0.5%。合计储量计算综合误差小于分油田储量计算误差可能是由属性建模和变气

水界面生成中地质统计学参数选取造成。综上,模型模拟储量与容积法计算储量的比对结果,反映了运用随机建模技术,可以较为精准地估计和测算天然气地质储量。

表 2 容积法计算的储量和模拟的储量精细对比

气田	工区 面积/km ²	含气 面积/km ²	孔隙度 下限/%	含气饱和度 下限/%	模型天然气 地质储量/ (×10 ⁸ m ³)	容积法天然气 地质储量/ (×10 ⁸ m ³)	误差/%
Y 气田	272.27	39.1	3	37	274	290	5.5
C 气田	205.16	64.8	3	37	324	305	6.2
合计	477.43	103.9	3	37	598	595	0.5

6 结论与讨论

- 1)针对大面积、少钻井的碳酸盐岩储层气田,充分研究并利用钻井资料、地震资料和储层反演资料,采用确定性建模和随机建模技术结合的方法可以建立较为准确的地质模型。该模型针对不同气田特点,通过选择不同约束系数和采用变气水界面,能够较好地刻画复杂的储层地质条件和多压力系统。
- 2)本文建立的储层地质模型能够较好地反映硅酸盐储层中井上孔隙度和含气饱和度分布情况。对比分析测井数据和属性模型数据,在小尺度上,钻井位置上测井曲线孔隙度和含气饱和度与各自模型上的数值和变化具有较高的一致性;在整体上,工区中 14 口钻井中 85.7%在测井曲线平均孔隙度和含气饱和度与各自模型的平均值误差都在 10%以内。同时,反演储层厚度和井上及模型上的孔隙度和含气饱和度具有较好的正相关性,证明反演储层厚度可用做确定性的约束条件。本文所建地质模型在数据上忠实于钻井数据且与钻井数据吻合率较高,在建模策略上忠实于已有地质认识,可以用于目标工区的油藏描述和储量计算,这为计算天然气储量提供了有力支撑。
- 3)不同约束系数的储层地质模型在实际应用中仍然不多,其各个方面的准确性还需要进一步的地质研究进行验证。基于不同分区方法的模型计算,分区越多,建模效果越好,但建模周期往往会延长。因此,如何在保证建模效果前提下,缩短建模周期也是未来研究中需要进一步考虑的问题。

参考文献:

[1] 胡向阳,熊琦华,吴胜和. 储层建模方法研究进展[J]. 石油大学学报(自然科学版),2001,25(1):107-112

[2] 衣妹,张立钊,翟艳超. 储层特性及地质建模方法的应用[J]. 承德石油高等专科学校学报,2012,14(4):26-30

[3] 唐美涛. 油藏描述中的储层建模技术[J]. 中国石油和化工标准与质量,2012,33(15):127

[4] 吴胜和,金振奎,黄沧钿,等. 储层建模[M]. 北京:石油工业出版社,1999

[5] 戴危艳. 储层不确定性建模研究[C]. 北京:中国地质学会数学地质与地学信息专业委员会,2014:229

[6] 李毓,杨长青. 储层地质建模策略及其技术方法应用[J]. 石油天然气学报,2009,31(3):30-35

[7] 陈培元,杨辉廷,刘学利,等. 塔河油田 6~7 区孔洞型碳酸盐岩储层建模[J]. 地质论评,2014,60(4):884-892

(责任编辑:湛 江)