

李 军,熊利平,张立勤,等. 基于 Markov 链模型的相控随机建模. 地球物理学进展, 2010, 25(1):298~302, DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2010.01.039.

Li J, Xiong L P, Zhang L Q, *et al.* Facies controlled stochastic modeling based on Markov chain models. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2010, 25(1):298~302, DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2010.01.039.

基于 Markov 链模型的相控随机建模

李 军¹, 熊利平¹, 张立勤¹, 边国兴², 刘 建³

(1. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 中国石油化工集团国际石油勘探开发有限公司, 北京 100083;

3. 中石化胜利油田滨南采油厂地质所, 滨州 250062)

摘 要 Markov 链模型在储层随机建模中的作用越来越受到关注,但其多用于类型属性(岩相、沉积相、沉积亚相等)的模拟,对于连续型属性(孔隙度、渗透率、含油气饱和度和等)的模拟还比较困难. 本文提出用 Markov 链模型相控建模方法模拟连续型属性的思路,即首先用 Markov 链模型模拟出类型属性,其次在类型属性约束下模拟出连续型属性,从而解决连续型属性不能产生突变边界的问题. 最后应用此方法进行了模拟实验,模拟结果显示不同岩相中孔隙度差异较大,而同种岩相中孔隙度变化较小,证明了此方法的可靠性和适用性.

关键词 Markov 链模型, 相控建模, 连续型属性, 类型属性

DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2010.01.039

中图分类号 P631

文献标识码 A

Facies controlled stochastic modeling based on Markov chain models

LI Jun¹, XIONG Li-ping¹, ZHANG Li-qin¹, BIAN Guo-xing², LIU Jian³

(1. *Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;*

2. *International Petroleum Exploration and Production Corporation, SINOPEC, Beijing 100083, China;*

3. *Binnan Oil Production Factory of Shengli Oilfield, SINOPEC, Binzhou 250062, China)*

Abstract The effect of Markov chain models in reservoir modeling is much concerned recently, but models are usually applied to simulating categorical attributes, such as lithofacies, sedimentary facies and subfacies, and very few to continuous attributes, such as porosity, permeability and oil saturation. This study propose the idea about using facies controlled method in Markov chain models, that is, using Markov chain models to get lithofacies and then simulate the continuous attributes under the constrict of lithofacies, which can deal with the problem of no definite boundary in simulation results of continuous attributes. The simulation tests show that distribution of porosity has an apparent variance in different lithofacies but slight change in each lithofacies, which verify this method is reliable and effective.

Keywords Markov chain model, facies controlled modeling, continuous attributes, categorical attributes

0 引 言

Markov 链模型在储层随机建模中的作用越来越

越受到重视^[1~3]. 与传统基于变差函数的地质统计模型相比,基于 Markov 链的地质统计模型可以很好地反映复杂空间的连续性,在实际应用中能更准

收稿日期 2009-04-12; 修回日期 2009-09-09.

基金项目 中国石油化工集团公司科技攻关项目(JP06001)资助.

作者简介 李军,男,1976 年生,2007 年获中国科学院地质与地球物理研究所博士学位,现从事油气储层预测工作.

(E-mail:lijun2007@pepris.com)

确地反映地质体的空间分布特征^[4]. 相对于储层岩相或沉积微相等类型变量来说,连续型变量空间展布形式似乎能够较容易地转化为数学模型并进而得到这些属性空间展布的图象,但地层连续型属性空间分布模拟方面的多数工作是利用 MRF(Markov Random Field)进行的^[5~7],而应用 Markov 链模型的较少,原因在于 Markov 链模型需要统计变量状态的转移概率矩阵使它较难模拟连续型属性. 连续型储层参数模型(孔隙度、渗透率、流体饱和度模型等)是储层属性建模的重要组成部分,是储层建模的最终目标. 本文尝试用两步建模法,即先用 Markov 链模型方法得到类型属性的分布,然后将其作为条件数据用序贯模拟方法得到连续型属性的分布,从而解决 Markov 链模型模拟连续型属性的难题.

1 Markov 链模型

Markov 链模型是一种进行随机过程分析的模型,这种随机模型的主要思想是认为系统在现在时刻 t_0 状态已知的情况下,其在时刻 $t > t_0$ 状态的条件分布与在 t_0 之前的状态无关^[8]. 其数学表达为:

$$\begin{aligned} Pr\{X_n = k \mid X_0 = h, \dots, X_{n-1} = j\} \\ = Pr\{X_n = k \mid X_{n-1} = j\}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 Pr 为概率, X_0, X_{n-1}, X_n 为 Markov 链上第 1、第 n 以及第 $n+1$ 个位置的状态, k, h, j 为其状态取值.

随机过程中的时间参数也可以是其它的量,如在解决空间问题时用距离参数^[9,10]. 该模型用于沉积地层分析中时,可以认为:沉积过程在整体行为上具有某种确定性规律的同时,由于受到各种环境因素的影响在局部范围内也具有随机性,从而沉积系统的变化可以被视为一个 Markov 过程,相应的地层属性(如岩相、沉积相)具有短程相关性,即 Markov 性^[11,12].

对于三维空间上的一个点,可认为受三个方向的 Markov 链作用,如果待模拟网格点 (i, j, k) 在 x 和 y 方向的网格点 (N_x, j, k) 与 (i, N_y, k) 为条件数据,若网格 $(i, j, k-1)$ 的状态 $Z_{i,j,k-1}$ 为 S_l , 网格 $(i-1, j, k)$ 的状态 $Z_{i-1,j,k}$ 为 S_m , 网格 $(i, j-1, k)$ 的状态 $Z_{i,j-1,k}$ 为 S_n , 网格 (N_x, j, k) 的状态 $Z_{N_x,j,k}$ 为 S_o , 网格 (i, N_y, k) 的状态 $Z_{i,N_y,k}$ 为 S_p , 则待模拟网格结点的 (i, j, k) 的状态 $Z_{i,j,k}$ 为 S_q 的概率为

$$\begin{aligned} Pr(Z_{i,j,k} = S_q \mid Z_{i,j,k-1} = S_l, Z_{i-1,j,k} \\ = S_m, Z_{i,j-1,k} = S_n, Z_{N_x,j,k} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} = S_o, Z_{i,N_y,k} = S_p) \\ = \frac{P_{lq}^z P_{mq}^x P_{oq}^{x(N_x-i)} P_{nq}^y P_{pq}^{y(N_y-j)}}{\sum_f P_{lf}^z P_{mf}^x P_{fo}^{x(N_x-i)} P_{nf}^y P_{fp}^{y(N_y-j)}}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 P 为不同方向转移概率矩阵中的相应元素; l, m, n, p, q, o 和 f 为状态空间 S 中元素的索引号; x, y 和 z 代表三维空间的方向, $(N_x - i)$ 表示转移步数.

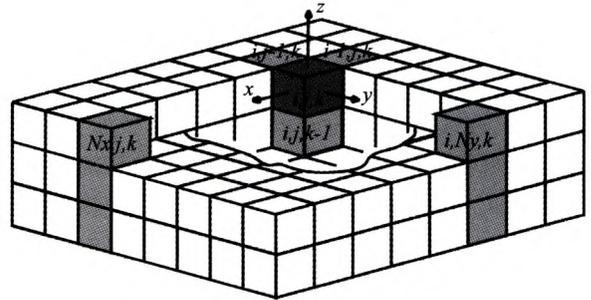


图 1 三维 Markov 链模型示意图
(井资料作为条件数据)

Fig. 1 3D Markov chain model with conditioning data on wells

由此可见 Markov 链模型利用变量状态的转移概率矩阵对随机过程的未来状态进行分析预测^[13]. 而且在建模过程中可以随时加入先验的地质认识,使得结果更加符合真实地质情况^[14~16]. Markov 链模型在地质中广泛应用,大多研究沉积岩石类型的转移及空间变化模式,如 Weissman 等^[17]应用 Markov 链与地质统计指示方法、层序地层学结合对冲积扇进行了模拟, Li 等^[18]应用它来研究地表岩性变化等等.

2 相控建模方法

2.1 相控建模方法原理

由于沉积微相或岩相对连续型储层属性的分布起着很大的控制作用,因此在建立相模型之后,在此基础上进行连续型储层属性的模拟的办法被称为第二步建模方法或相控建模方法^[19]. 相控建模方法体现了这样一个思路:将连续型储层属性的非均质性、各向异性划到宏观尺度(不同相之间的空间配置)^[20]和微观尺度(单一相内部)两个层次,将连续属性的非均质性逐次加以解决. 这个思路考虑到了地质现象之间的相互制约关系,是比较符合地质规律的.

正如有学者^[21]建议“主要岩相的空间结构首先

应表征出来”,“然后,模拟每种岩相间岩石物性的分布”.两步模拟不仅能描述物理现象,而且还能更好地避免连续的随机函数模拟的均质假设超出范围.这样在模拟连续属性时,面对横向上数据的稀疏性以及地层侧向和纵向上的巨大的尺度差异性时,就可以解决随机函数模型穿过明显的岩性类型边界时不能产生突变的问题.

2.2 相控模拟算法

基于以上原理,Markov 链相控建模方法模拟连续型属性的思路为:利用 Makrov 链模型模拟出类型属性分布,统计连续属性的分布函数,在选择类型属性约束下以连续属性分布函数为先验分布贯穿模拟出连续型属性的分布.其算法步骤如下:

(1)选择合适的间距,对三维空间进行网格化.

(2)将单井岩性数据进行网格化,并计算垂向的转移概率矩阵以及其它两个方向的转移概率矩阵.

(3)从最下面一层开始,对未知点各种岩性可能出现的概率进行计算,进行 Monte Carlo 抽样,对未知网格进行赋值.

(4)依次完成所有未知网格的赋值之后,给不同的岩性赋予不同的颜色并显示模拟图像,即一次实现完成,一个相模型生成.

(5)从最下面一层开始,对其结点分相按照连续属性的分布函数随机抽值进行赋值,完成所有未知网

格的赋值之后,给不同的属性值赋予不同的颜色并显示模拟图像,即一个连续性属性模型实现完成.

(6)重复步骤(5),得到该相模型控制下的若干个连续储层属性分布模拟的实现结果.

(7)进行下一个相模型的实现,重复(3)至(6)步骤,直到满意的结果.

3 模拟实验研究

3.1 假设的已知条件

假设已知三维空间上四口井的岩性资料,如图 2 所示,共有 A、B、C、D 四种岩性,经统计其由下向上岩性转移记数矩阵具有较强的 Markov 性,设定

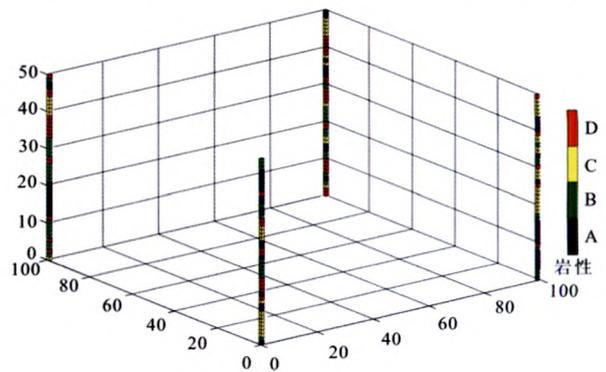


图 2 具有四口井的待模拟三维空间
(三个方向的坐标皆为网格数)

Fig. 2 A ready 3D space with four wells for simulation

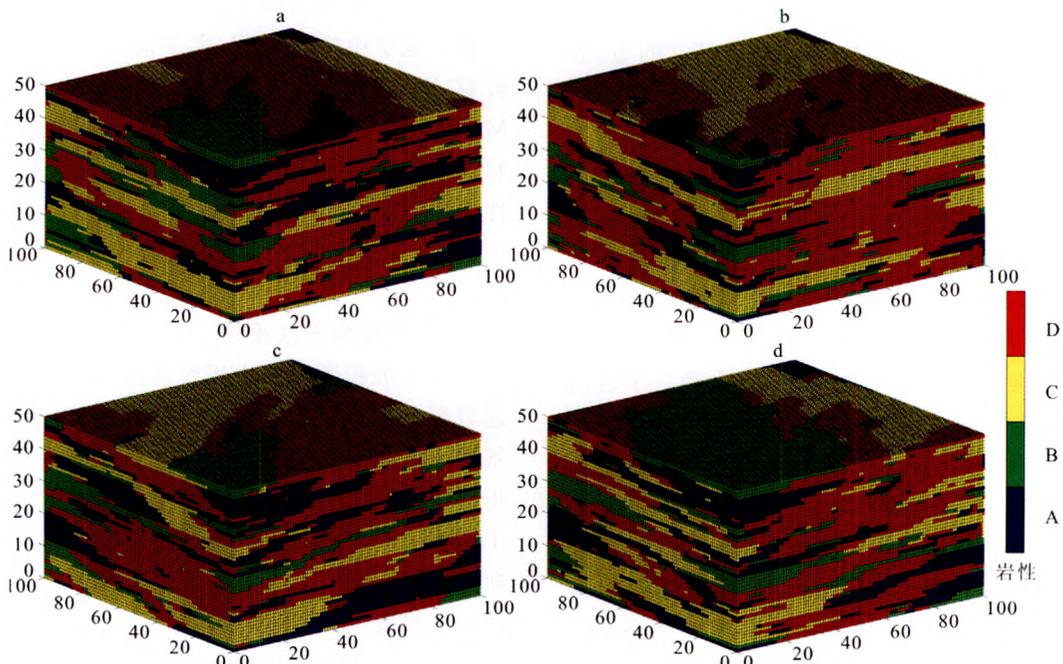


图 3 岩相随机模拟的四个结果

Fig. 3 Four results of lithofacies stochastic simulation

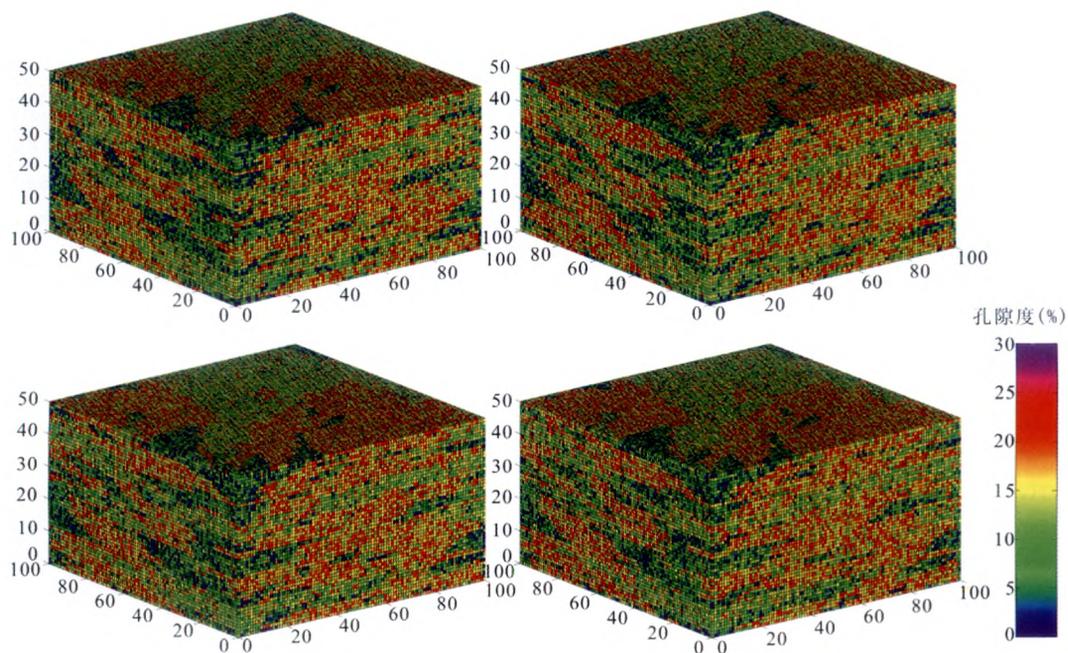


图 4 孔隙度随机模拟的四个结果

Fig. 4 Four results of porosity stochastic simulation

四口井位于工区四个角点,东西井距为 1000 m,南北井距为 1000 m,用于模拟计算的网格结点为 x 方向、 y 方向和 z 方向分别为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的长方体,模拟空间为 $100\times 100\times 50$ 的网格系统.图 3 为 Markov 链模型多个随机模拟岩相结果中的四个实现,选择其中的 b 作为岩相控制模型进行孔隙度的随机模拟.假设 A、B、C、D 四种岩性发育的孔隙度分布呈正态分布,其方差和均值如表 1 所示.

表 1 孔隙度正态分布参数表

Table 1 Parameters of Gaussian distribution of porosity

岩性	A	B	C	D
均值(%)	5	10	15	20
方差	4.08	4.79	4.23	3.44

3.2 模拟结果

图 4 为在相控条件下模拟的孔隙度分布的四个实现的三维立体图,不同的颜色代表孔隙度的变化.从图中可以看出四个随机的实现总体特征相似,其高值分布区和低值分布区所在位置变化不大,呈现一定的规律性.例如在假设条件下岩性 D 的孔隙度均值大于岩性 A 的孔隙度均值,而图中相应岩性 D 发育的位置上孔隙度颜色趋近于红色和黄色,而

岩性 A 发育的位置颜色趋近于蓝色和绿色,说明岩性 D 的孔隙度均值大于 A 的孔隙度均值,二者有明显的分带性.而在每一种岩性的内部,孔隙度整体呈现出一定的颜色,如在岩性 D 发育的位置上多呈红色,孔隙度范围在 15~25% 之间,表明岩相内部孔隙度变化较平稳.孔隙度与岩相分布保持了一致性,既保证了随机性,又符合地质上的规律.

4 结 语

Markov 链相控建模方法利用类型属性的转移概率矩阵模拟了类型属性的空间分布,再将其作为条件数据利用连续型属性的分布函数模拟连续型属性的空间展布,解决了连续型属性模拟的难题,拓宽了 Markov 链在储层随机建模中的应用范围.按照这种方法,如果某个地区存在大量的岩石物性统计资料,渗透率和含油气饱和度等参数也可以利用其分布函数的确定得到理想的效果.

致 谢 本文完成过程中得到中科院地质与地球物理研究所郝天珧研究员的指导,深表谢意!

参 考 文 献 (References):

- [1] 刘振峰,郝天珧,方辉.用 Markov 链模型随机模拟储层岩相空

- 间展布[J]. 石油学报, 2005, 26(5): 57~60.
- Liu Z F, Hao T Y, Fang H. Using Markov chains models to characterize lithofacies of reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(5): 57~60.
- [2] Li W D. Markov Chain Random Fields for Estimation of Categorical Variables[J]. *Math. Geol.*, 2007b, 39(3): 321~335.
- [3] 李军, 郝天珢, 刘建, 等. 基于不同邻域系统的马尔可夫链模型的储层岩相随机模拟[J]. *现代地质*, 2006, 20(4): 621~627.
- Li J, Hao T Y, Liu J, *et al.* Stochastic simulation of reservoir lithofacies based on Markov chain models with different neighborhood systems[J]. *Geoscience*, 2006, 20(4): 621~627.
- [4] Elfeki A, Dekking M. A Markov chain model for subsurface characterization; Theory and applications [J]. *Math. Geol.*, 2001, 33 (5): 568~589.
- [5] Lee S H, Malallah A, Datta-Gupta A. Multiscale data integration using Markov random fields [J]. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 2002, 5: 68~78.
- [6] 刘振峰, 郝天珢, 王峰. 基于 GMRF 的连续型储集层属性分布随机模拟[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(6): 75~78.
- Liu Z F, Hao T Y, Wang F. Stochastic simulating distribution of continuous reservoir attributes based on the GMRF Model[J]. *Petroleum exploration and development*, 2005, 32(6): 75~78.
- [7] Shmaryan L E, Journel A G. Two Markov Models and Their Application[J]. *Math. Geol.*, 1999, 31(8): 965~988.
- [8] 盛骤, 谢式千, 潘承毅编. *概率论与数理统计*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 354~367.
- Sheng Z, Xie S Q, Pan C Y. *Probability theory and mathematical statistics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. 354~367.
- [9] Schwarzacher W. Repetitions and cycles in stratigraphy [J]. *Earth Sci. Rev.*, 2000, 50, 51~75.
- [10] Miall A D. Markov chain analysis applied to an ancient alluvial plain succession[J]. *Sedimentology*, 1973, 20(3): 347~364.
- [11] 李汉林, 赵永军编. *石油数学地质*[M]. 东营: 石油大学出版社, 1998, 247~253.
- Li H L, Zhao Y J. *Petroleum Mathematics Geology* [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 1998, 247~253.
- [12] Yarus J M, Chambers R L. 随机建模和地质统计学--原理、方法和实例研究[M]. 穆龙新, 陈亮, 译. 北京: 石油工业出版社, 2000, 52~61.
- Yarus J M, Chambers R L. *Stochastic modeling and geostatistics-principle, methods and case studies* [M]. Beijing: petroleum industry press, 2000, 52~61.
- [13] Powers D W, Easterling R G. Improved methodology for using embedded Markov chains to describe cyclical sediments [J]. *J Sediment Petrol.*, 1982, 52(3): 913~923.
- [14] 李军, 郝天珢. 油气储层随机模拟方法综述[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(2): 458~464.
- Li J, Hao T Y. Review on methods of oil & gas reservoir stochastic simulation [J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(2): 458~464.
- [15] Doveton J H. An application of Markov chain analysis to the Ayrshire coal measures succession [J]. *Scott. Jour. Geol.*, 1971, 7(1): 11~27.
- [16] Rolke W A. Continuous-time Markov processes as a stochastic model for sedimentation[J]. *Math. Geol.*, 1991, 23(3): 297~304.
- [17] Weissmann G S, Fogg G E. Multiscale alluvial fan heterogeneity modeled with transition probability geostatistics in a sequence stratigraphic framework [J]. *J Hydrol.*, 1999, 226(1-2), 48~56.
- [18] Li W, Li B, Shi Y. Markov-chain simulation of soil textural profiles[J]. *Geoderma*, 1999, 92: 37~53.
- [19] 吕晓光, 王德发, 姜洪福. 储层地质模型及随机建模技术[J]. *大庆石油地质与开发*, 2000, 19(1): 10~15.
- Lu X G, Wang D F, Jiang H F. Reservoir geologic model and random modeling technique [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2000, 19(1), 10~15.
- [20] 吴媚, 符力耘, 李维新. 高分辨率非线性储层物性参数反演方法和应用[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(2): 546~557.
- Wu M, Fu L Y, Li W X. A high-resolution nonlinear inversion method of reservoir parameters and its application to oil/gas exploration [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(2): 546~557.
- [21] Deutsch C, Journel A. *GSLIB: geostatistical software library and users guide*[D]. New York, Oxford University Press, 1992.