

文章编号: 0253-2697(2013)06-0140-05 DOI: 10.7623/syxb201301017

基于沉积过程建模算法 Alluvsim 的改进

李少华¹ 刘显太² 王军² 龚蔚青² 卢文涛³

(1. 长江大学地球科学学院剩余资源研究组 湖北荆州 434023;
2. 中国石化胜利油田公司地质研究院 山东东营 257015; 3. 中国石化江汉油田公司勘探开发研究院 湖北武汉 430223)

摘要: 对基于沉积过程的河流相储层随机建模算法 Alluvsim 的基本概念及主要实现步骤进行了描述,与传统的储层随机建模方法相比,基于沉积过程的建模方法更有效地将与沉积过程有关的地质信息以及先验的地质知识整合到建模过程中,能够更加真实地再现储层构型要素,如河道、点坝、天然堤、决口扇等的几何形态和内在成因上的联系,进而建立更为真实的地质模型。针对建模算法 Alluvsim 无法刻画点坝砂体内部构型的不足,对该算法进行了改进,实现了点坝内部构型的模拟,改进后的算法能够灵活地控制点坝侧积层的倾角、延伸长度、频率等对流体运动起重要作用的关键参数,实现了河道的部分或全部废弃。并分析了基于沉积过程的随机建模算法存在的一些不足。

关键词: 沉积过程; 点坝; 随机建模; 算法改进; 河流

中图分类号: TE19 文献标识码: A

Improvement of the Alluvsim algorithm modeling based on depositional processes

LI Shaohua¹ LIU Xiantai² WANG Jun² GONG Weiqing² LU Wentao³

(1. Remaining Resource Research Group, School of Geoscience, Yangtze University, Jingzhou 434023, China;
2. Geological Science Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257015, China;
3. Research Institute of Exploration & Development, Sinopec Jianghan Oilfield Company, Wuhan 430223, China)

Abstract: This paper introduced basic concepts, principles and modeling steps of the Alluvsim algorithm for the depositional-process-based reservoir stochastic modeling. Compared with traditional stochastic modeling methods, this modeling method, which efficiently integrates various kinds of data with experts' knowledge based on depositional processes, enables a more geologically reproduction of the geometry and relationship of architectural elements of reservoirs, such as channel, point bar, levee and crevasse splay. Generally, the Alluvsim algorithm can not exactly describe internal architectural elements of a point bar, such as lateral-accretion units and associated mud drapes. Thus, an improvement was made to characterize the key parameters of mud drapes in a point-bar, including dip angle, extending length and frequency, which significantly affect the movement of fluids. In addition, channels could be partly or wholly abandoned in the new method. At last, some limits of the present depositional-process-based modeling algorithm were discussed.

Key words: depositional process; point bar; stochastic modeling; algorithm improvement; channel

已有的沉积相随机建模方法,如序贯指示模拟、截断高斯模拟、基于目标的模拟和多点地质统计学模拟等^[1-6],均是基于对已有数据点之间的空间相关性分析基础上进行的一种模式再现插值方法。区别只是在于采用不同的参数来描述数据点之间的空间相关性,如序贯指示采用基于两点统计的变差函数,而多点地质统计学采用训练图像。由于这类建模方法没有考虑到构型要素之间内在的成因联系,因而难以合理刻画构型要素之间的相互关系。鉴于传统的储层随机建模方法在整合先验地质信息方面存在的不足,特别是很少考虑沉积过程方面的因素,Pyrcz 在前人研究成果的

基础上,开发了针对河流相储层的基于沉积过程的建模算法 Alluvsim^[7-8]。Alluvsim 算法有效地综合了与沉积过程(事件)有关的地质信息和一些先验的地质知识,从模拟目标体的沉积过程出发,定量描述目标体的几何形态和空间分布,能够模拟河道的侧向迁移、改道和决口等过程。同时,该方法充分利用从先验地质知识得到的一系列经验数据(例如河道、天然堤、决口扇的形态参数),产生的模型更为真实。目前该算法能够较好地模拟点坝的形成过程及几何形态,但是尚不能模拟点坝内部构型要素,如泥岩侧积层的分布(包括倾角、向下延伸长度、间距及在一个点坝内的侧积层个数

基金项目:国家重大科技专项(2011ZX05011-001)与国家自然科学基金项目(No. 41272136)资助。

第一作者及通讯作者:李少华,男,1972年8月生,2003年获中国石油勘探开发研究院博士学位,现为长江大学地球科学学院教授、硕士生导师,主要从事地质统计学与储层建模方面的科研与教学工作。Email: jpishli@163.com

等)。已有研究表明,这些参数对于流体的运动有着重要的控制作用^[9-12],是影响曲流河储层剩余油分布的关键因素。笔者在深入剖析 Alluvsim 源代码的基础上,从曲流河沉积机理出发,对 Alluvsim 算法进行改进,设计并实现了新的点坝内部构型建模方法,建立了更符合地质规律的三维点坝内部构型模型。

1 Alluvsim 算法

1.1 基本概念

基于沉积过程的建模算法,Alluvsim 算法结合了与沉积过程有关的地质信息,通过河道的演化过程再现河流相储层构型要素的几何形态特征和空间分布。该算法包含 3 个关键的概念:①河道中线;②河道中线操作;③河流相储层构型要素。

河道中线: Alluvsim 算法通过改变河道中线的形态和位置来模拟河道的演化过程。河道中线是基于沉积过程建模的核心,它的形态和位置控制着河流相构型要素的分布。一条河道中线由一组控制节点组成,每个节点保存该位置的坐标和河道的属性。基于沉积过程的方法还引入了层次的概念,成因上有联系的河道中线组成河道中线复合体,它们通过沉积过程联系起来。例如,一个河道复合体可以描述河道发生分叉形成的辫状河。

河道中线操作: Alluvsim 算法整合了沉积学家、水动力学家的研究成果,通过产生和改变河道中线来模拟河道的演化过程。河道中线操作过程主要包括:①初始化:河道初始化过程用来产生一条新的河道中线。②改道:用来描述河道由于决口而形成新的分支河道的过程,该过程从决口处产生一条新的河道中线。③加积:河道加积描述不同期河道叠加的过程,可以通过河道中线高度的抬升来实现。④侧向迁移和截弯取直:河道中线的侧向迁移是根据 Howard 提出的凹岸侵蚀凸岸侧向迁移模型来实现的^[13]。在每次侧向迁移中,河道中线上每个节点的迁移距离与方向是通过节点所存储的属性(如局部曲率和方位角)和用户输入的参数(如河道宽度、河道深度、摩擦系数、侵蚀系数)计算求得。当节点移动后,需要检查截弯取直是否发生。如果发生,则移除废弃的曲流环部分。最后对迁移后的节点进行样条插值,这样侧向迁移后的河道中线就产生了。

河流相储层构型要素: Alluvsim 方法考虑的构型要素包括河道、侧积体、天然堤、决口扇、废弃河道、以及漫滩。

1.2 实现步骤

Alluvsim 算法通过对河道中线的操作来刻画河

流的演化过程以及相关构型要素的几何形态与分布,Alluvsim 算法的建模步骤为:

(1) 建立储层地质概念模型及地质知识库,建立描述河道中线及各个构型要素几何形态、规模等相关参数。

(2) 产生一个候选河道中线库,刻画河道的平面形态。

(3) 根据河道分布规律随机地选择一条河道中线,这样就产生了第一条河道。

(4) 根据几何形态参数对河道中线上所有的节点赋值,建立该条河道的三维构型模型。

(5) 产生下一条河道。定义了两个控制河道演化过程的概率值 P_{AO} (产生新河道的概率)和 P_{AI} (河道发生分叉的概率),根据先验知识随机产生一个介于 0~1 之间的常数 P 。如果 $P < P_{AO}$,产生一条新河道,重复步骤(3)和(4);如果 $P < P_{AO} + P_{AI}$,河道发生分叉,产生一条新的支流河道,重复步骤(4);否则河道发生侧向迁移,通过移动节点的位置产生新的河道中线,重复步骤(4)。

(6) 计算目标函数值:计算河道、天然堤、侧积体和决口扇所占网格数与模拟总网格数的比值。

(7) 判断 NTG 是否达到指定阈值,达到则模拟结束,否则转到步骤(3)。

(8) 对产生的模型进行条件化处理,得到最终的随机模拟结果。

2 Alluvsim 算法的改进

随着油田开发程度的不断深入,砂体内部的剩余油挖掘逐渐成为油田开发的主要目标。曲流河储层作为陆相油田重要储层,其点坝内部侧积层对油藏开发以及剩余油分布的影响在生产中已经凸显出来,开展点坝内部结构解剖,建立点坝侧积层分布模型,已经成为曲流河储层剩余油挖掘、提高油气采收率的重要保证。目前基于沉积过程的建模算法,Alluvsim 算法能够较好地模拟曲流河的决口、改道、侧向迁移以及加积等,可以刻画点坝外部形态。但是不能刻画点坝内部的半连通模式,无法描述泥岩侧积层的关键参数,如倾角、向下延伸长度、间距及在一个点坝内的个数等,有研究表明这些参数对于流体的运动有着重要的控制作用。这些参数对砂体底部是否容易形成“大孔道”、剩余油的富集部位以及开发方案的制定有非常重要的影响。笔者在深入剖析 Alluvsim 算法源代码的基础上,从曲流河沉积机理出发,对 Alluvsim 算法加以改进,设计了一种新的点坝侧积层建模方法,建立了符合地质实际的三维点坝内部构型模型。

2.1 改进方法

在 Alluvsim 算法中,点坝的模拟是通过河道中线的不断侧向迁移直至河道废弃来实现的。河道由于在凹岸发生侵蚀、在凸岸产生沉积作用,而不断地向凹岸方向发生侧向迁移,如图 1 所示,黑线代表最初河道的边界,红线表示一次较大规模侧向迁移后河道的边界,蓝线表示再一次侧向迁移后河道的边界。AA' 与 BB' 为不同位置对应的河道切片。河道不会无限制发生侧向迁移,当河道弯曲到一定程度会发生截弯取直,曲流环废弃。在 Alluvsim 算法中,只是保留了废弃河道和点坝砂体,而没有刻画点坝内部的侧积体和泥岩侧积层,也就无法刻画点坝的半连通体模式。为了能够更好刻画点坝内部的非均质性,需要刻画其内部的侧积体和侧积层。改进的基本思想就是保留每一次侧向迁移后的河道界面,两期河道凸岸边界夹持的为一个点坝侧积体,最后一期河道为废弃河道(图 1 右下深灰色部分),中间期次河道凸岸底边界部分保留,作为侧积层(图 1 右下红色部分)。

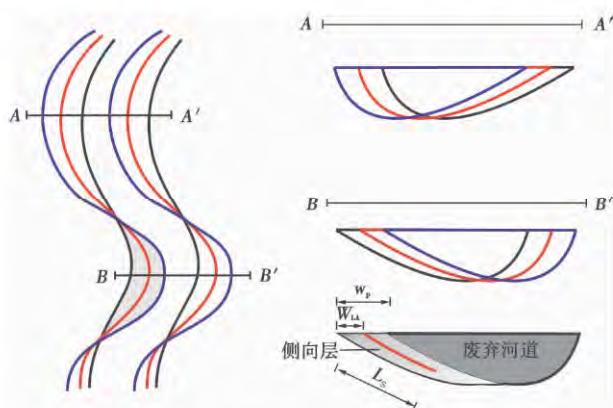


图 1 点坝形成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of point-bar Formation

改进的具体步骤如下:

(1) 产生一条河道中线,根据地质知识库对该河道进行赋值,如河道宽度、几何形态、厚度等;用一个三

维数组 $ihs(i_x, i_y, i_{time})$ 保留河道的底部形态, i_{time} 表示第几期河道, i_x, i_y 表示河道底面对应的平面坐标, 数组的值表示第 i_{time} 期河道对应 i_x, i_y 坐标的底面高程值; 该河道底面所圈的体积全部赋值为河道[图 2(a) 中黄色部分], 河道底面赋值为泥岩[图 2(a) 中灰色部分]。

(2) 判断是否发生侧向迁移,如果发生侧向迁移,需要给出侧向迁移的距离,这个距离可以根据经验或是本地区的统计规律等给出,可以是一个常数,也可以从某种分布中抽取,改进的算法实现了常数、三角分布和高斯分布等多种选择。记录侧向迁移后的河道底面形态,使用数组 $ihs(i_x, i_y, i_{time+1})$ 描述。一次迁移后得到的结果如图 2(b) 所示,新河道沉积体会替代原来河道的沉积。

(3) 如果发生多次迁移,还需要预先指定迁移的次数。这个次数也可以是常数,或是从三角分布、高斯分布等分布函数中抽样产生。当然前提是在地质分析和地质知识库的指导下,建立合理的侧向迁移次数分布函数。每次都保留迁移后河道底面,最后一期河道为废弃河道,相代码赋值为废弃河道[图 2(c) 中右边灰色部分]。

(4) 对中间期次河道底面进行操作。泥岩侧积层形成后,由于后期洪水的冲刷,侧积层的底部通常难以保存,因此,薛培华教授总结为“半连通体”模式^[14]。侧积层延伸距离是一个相当复杂的问题,从已有文献看,侧积层延伸距离具有较强的随机性。为了模拟各种可能的情况,设置了一个可以控制侧积层延伸长度的参数。在具体模拟过程中,根据经验数据设置延伸长度的分布,主要采用相对长度的方法,如图 2(d) 所示,第二期河道产生的泥岩侧积层只保留 $1/2$ 的延伸长度。另外,河道可能是部分废弃,这样砂体的分布样式差别很大。对原有算法进行改进,通过按照一定比例上移河道底面来实现河道部分或全部废弃,图 2(d) 中河道为部分废弃。



图 2 Alluvsim 算法改进步骤示意图

Fig. 2 Realization steps of modified Alluvsim

2.2 改进前后效果对比

图3为改进前后模拟结果对比,图3(a)、3(c)为改进算法后得到模拟结果的平面与剖面图,图3(b)、3(d)为原始Alluvsim算法得到模拟结果的平面与剖面图。对比改进前、后的模拟结果可以看出,传统的Alluvism算法较好地模拟了曲流河的几何形态和点坝的分布。改进后的算法保留传统方法的优点,同

时还进一步刻画了点坝内部侧积层与侧积体的分布,很好地再现了点坝“半连通体”的沉积特点。改进后的算法可以根据实际工区的具体情况,再现点坝内部结构的分布特征,如侧积体的规模、侧积层的倾角及向下延伸长度、点坝内侧积体发育的个数及间距等控制流体运动的关键参数,并且能够实现河道的部分废弃[图3(c)]。

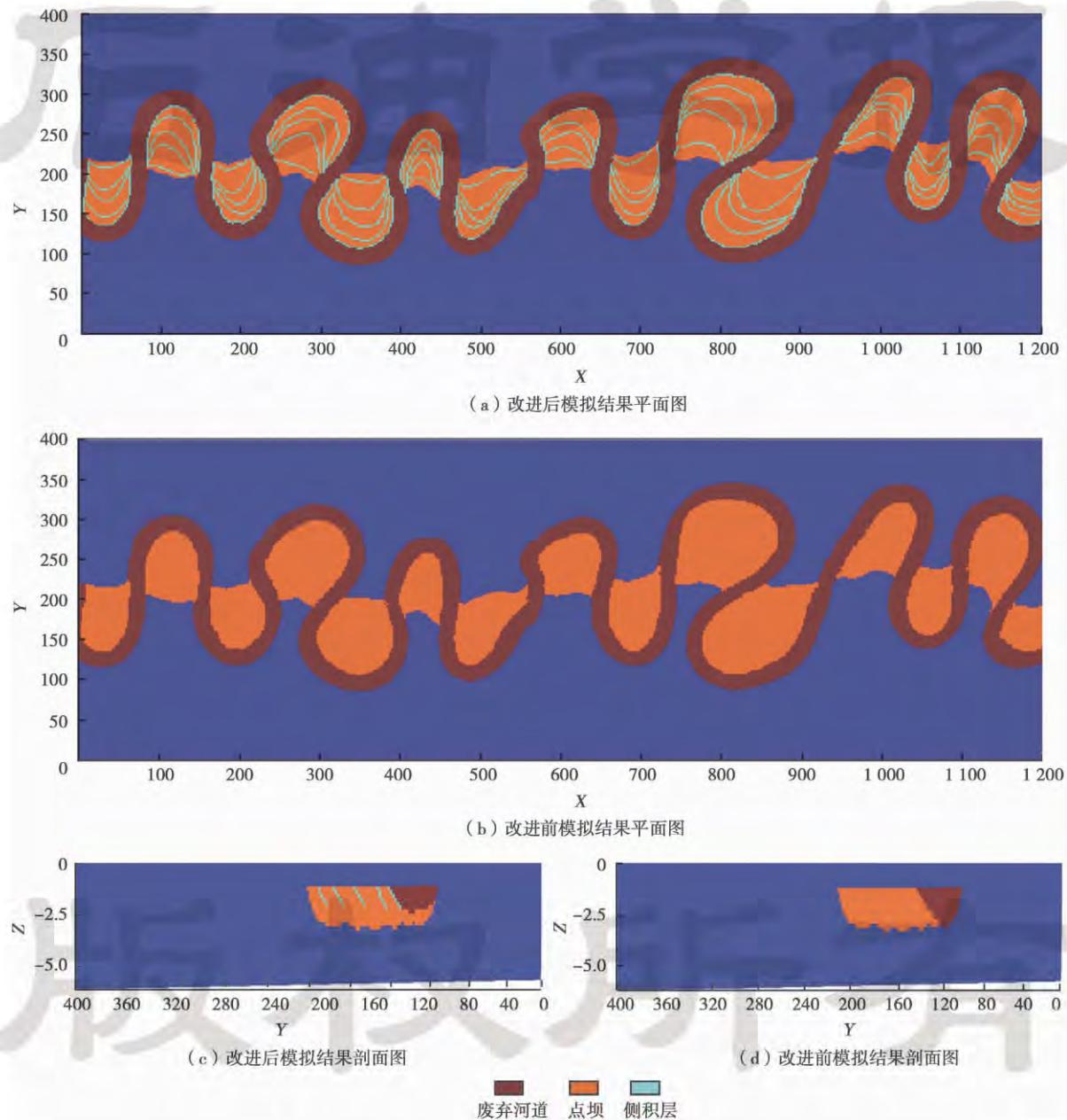


图3 算法改进前后产生的模型比较

Fig. 3 Comparison between the models constructed by original method and improved method

3 结 论

(1) 改进的算法不仅刻画了点坝砂体内部结构如侧积层与侧积体的分布特点,还能够灵活地控制点坝

内部侧积层分布的关键参数,如向下延伸长度、间距及在一个点坝内的个数等,进而可以对点坝规模、侧向迁移距离、侧积层个数及保存程度等多个方面进行合理的控制;

(2) 改进的算法实现了河道部分废弃的功能,更好地刻画了点坝砂体的分布特点;

(3) 基于沉积过程的建模算法 Alluvsim 与传统的建模方法相比,在刻画目标体几何形态和表征储层内部结构成因联系方面有了较大进步。但是由于该方法尚处于初期阶段,存在许多需要进一步完善的地方。如目前的模拟只是针对水平斜列式侧积层模式,尚不能模拟斜列式和波浪式的侧积层分布,多井情况下的井数据条件化依然是个难题。

参 考 文 献

- [1] Deutsch C V, Journel A G. GSLIB: Geostatistical software library and users guide [M]. New York: Oxford University Press, 1992: 340.
- [2] Deutsch C V, Wang Libing. Hierarchical object-based stochastic modeling of fluvial reservoirs [J]. Mathematical Geology, 1996, 28(7): 857-880.
- [3] Zhang Tuanfeng. Incorporating geological conceptual models and interpretations into reservoir modeling using multiple-point geostatistics [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(1): 26-35.
- [4] 李少华, 张昌民, 张柏桥, 等. 布尔方法储层模拟的改进及应用 [J]. 石油学报, 2003, 24(3): 78-81.
Li Shaohua, Zhang Changmin, Zhang Baiqiao, et al. Improvement of framework models established with Boolean simulation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(3): 78-81.
- [5] 尹艳树, 吴胜和, 张昌民, 等. 用多种随机建模方法综合预测储层微相 [J]. 石油学报, 2006, 27(2): 68-71.
Yin Yanshu, Wu Shenghe, Zhang Changmin, et al. Integrative prediction of microfacies with multiple stochastic modeling methods [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2): 68-71.
- [6] 吴胜和, 李文克. 多点地质统计学——理论、应用与展望 [J]. 古地理学报, 2005, 7(1): 137-144.
Wu Shenghe, Li Wenke. Multiple-point geostatistics: theory, application and perspective [J]. Journal of Paleogeography, 2005, 7(1): 137-144.
- [7] Pyrcz M J. The integration of geologic information into geostatistical models [D]. Edmonton: University of Alberta, 2004.
- [8] Pyrcz M J, Boisvert J B, Deutsch C V. ALLUVSIM: a program for event-based stochastic modeling for fluvial depositional systems [J]. Computers & Geosciences, 2009, 35(8): 1671-1685.
- [9] 白振强, 王清华, 杜庆龙, 等. 曲流河砂体三维构型地质建模及数值模拟研究 [J]. 石油学报, 2009, 30(6): 898-902.
Bai Zhenqiang, Wang Qinghua, Du Qinglong, et al. Study on 3D architecture geology modeling and digital simulation in meandering reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6): 898-902.
- [10] 马世忠, 孙丽, 范广娟, 等. 地下曲流河道单砂体内部薄夹层建筑结构研究方法 [J]. 沉积学报, 2008, 26(4): 632-638.
Ma Shizhong, Sun Yu, Fan Guangjuan, et al. The method for studying thin interbed architecture of burial meandering channel sandbody [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(4): 632-638.
- [11] 岳大力, 吴胜和, 刘建民. 曲流河点坝地下储层构型精细解剖方法 [J]. 石油学报, 2007, 28(4): 100-103.
Yue Dali, Wu Shenghe, Liu Jianmin. An accurate method for anatomizing architecture of subsurface reservoir in point bar of meandering river [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 100-103.
- [12] 陈程, 宋新民, 李军. 曲流河点砂坝储层水流优势通道及其对剩余油分布的控制 [J]. 石油学报, 2012, 33(2): 257-263.
Chen Cheng, Song Xinmin, Li Jun. Dominant flow of point-bar reservoirs and their control on the distribution of remaining oils [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 257-263.
- [13] Howard A D. Model channel migration and floodplain sedimentation in meandering streams [M]. New York: John Wiley and Sons, 1992: 1-42.
- [14] 薛培华. 河流点坝相储层模式概论 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 51-63.
Xue Peihua. An introduction to reservoir models of point bar facies [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 51-63.

(收稿日期 2012-05-04 改回日期 2012-08-27 责任编辑 黄小娟)