

扇形沉积体生长过程的动力学机制及分形模拟

周江羽¹ 吴冲龙² 李 星² 田宜平²

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 中国地质大学资源学院, 武汉 430074)

摘要: 扇形沉积体是我国内陆及近海中、新生代含油气盆地的重要油气聚集区, 如何定量地表征沉积体的分布状况及内部结构参数的空间变化规律, 对指导油气勘探具有重要意义. 扇形沉积体的生长过程是一个复杂的非线性动力学过程, 通过对其生长的沉积动力学、混沌动力学和分形动力学机制的分析, 认识到扇形沉积体的生长具有分形特征, 决口过程是造成其外部形态复杂多变的重要原因; 分形几何学理论在沉积体定量建模和模拟方面具有较好的应用前景. 采用分形-地质统计学相结合的方法, 对扇形沉积体的外部形态和内部结构特征实施了计算机模拟, 并对模拟结果进行了讨论.

关键词: 扇形沉积体; 沉积动力学; 混沌; 分形; 地质统计学; 计算机模拟.

中图分类号: P512.2 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2000)01-0033-06

作者简介: 周江羽, 男, 副教授, 1962年生, 1998年毕业于中国地质大学研究生院, 获博士学位, 现为中国科学院广州地球化学研究所博士后, 主要从事盆地分析、沉积动力学及石油地质等方面的科研和教学工作.

扇形沉积体是指平面形态呈扇形的沉积体的总称, 包括冲积扇、扇三角洲、水下扇、决口扇和三角洲沉积体. 油气勘探实践证明, 我国内陆及近海中、新生代含油气盆地中所发现的石油储量, 与扇形沉积体有关的已占总储量的62.5%^[1-4]. 目前, 随着油气勘探的不断深入, 其勘探成本和难度也日益增加. 在不同勘探阶段、不同资料详度的地区, 如何利用有限的资料去定量表征沉积体的空间分布状况及内部结构参数的空间变化规律, 指导油气勘探, 降低勘探风险, 是勘探决策部门密切关注的问题.

通过对扇形沉积体生长过程的动力学机制分析, 可以建立较为客观的静态和动态地质模型, 然后采用合适的数学模型对沉积体实施计算机模拟. 前人研究成果表明, 利用常规地质统计模型、分形插值模型、分形-地质统计模型、条件和随机模拟模型在解决沉积体的内部结构参数模拟方面已取得了一系列重要成果, 但形态模拟方面则显得很薄弱^[5-11]. 本文试图从扇形沉积体生长过程的动力学机制分析入手, 探讨其生长的动态过程, 建立地质和数学模

型, 并对其形态和结构实施分形-地质统计模拟.

1 动力学机制分析

传统沉积学的研究方法在勘探程度较高的含油气盆地沉积体研究中起到了积极的作用, 所描绘的沉积体外部边界形态框架可以较准确地表示沉积体的空间分布特征, 对指导油气勘探具有重要意义^[12-16].

一个扇形沉积体是多个平面上或垂向上呈类似形态沉积体的集合, 是在不同的沉积背景条件下形成的. 它的生长过程是一个不断进积—决口—朵体废弃的复杂动力学过程, 决口过程是造成三角洲外部形态差别的重要因素^[17]. 由于决口的位置不同, 形成了3种不同的生长模型: 均匀对称生长模型、均匀非对称生长模型和非均匀非对称生长模型. 第一种以洱海弥苴河三角洲为代表(图1), 第二种以密西西比河三角洲库比茨决口扇为代表, 第三种以密西西比河三角洲(图2)、鄂尔多斯盆地神木地区延安组(J_{2+3})三角洲为代表. 在均匀对称生长模型中, 沉积体的生长具有一个主生长轴(或称为生长中心), 并围绕这一生长轴向两侧近似均匀对称生长,



图 1 洱海弥直河三角洲的分形生长模型

Fig. 1 Fractal growth model of Miqie River delta, Erhai in Yunnan Province

1~6 为演化阶段, 数据为分形盒维数



图 2 河控鸟足状三角洲的决口(a)和高级分支现象(b)

Fig. 2 Crevasse (a) and advanced branch (b) of a fluvial-dominated bird-foot delta

其生长过程具有一定的规律性. 在非均匀非对称生长模型中, 虽然也存在着一个主生长轴, 但两侧的生长具有不确定性, 因而在形态上显得更为复杂多变, 具明显的非线性特征.

具体测定各三角洲的生长维数后发现, 三角洲的生长具有分形特征, 其平均生长盒维数都在 1.2~1.4 之间. 维数的大小反映了沉积体外部形态的复杂程度, 维数的变化幅度反映了其沉积背景的稳定程度^[18]. 一般而言, 随着三角洲的不断生长, 其分维数也逐渐增大. 河控三角洲的这种特征比其他扇形沉积体(如冲积扇、扇三角洲、决口扇和水下扇)表现得更为明显, 且到了一定的生长阶段才表现出较为明显的形态生长因子, 一旦形态因子形成后就表现出较为明显的稳定生长过程和非稳定生长过程. 这一点与其他扇形沉积体有较大区别, 如冲积扇和决口扇等形态较为简单的沉积体, 一开始就可能表现出较为明显的形态生长因子, 由于它们具有近源快速堆积的特定水动力条件, 因而每一生长阶段都

呈现出类似的外部形态, 表现在各生长阶段分维数的变化幅度较小的特点.

从混沌动力学机制分析, 河控三角洲体系是通过不断的生长、决口和废弃等一系列复杂的非线性动力学过程而形成的一种时空有序结构. 在体系的演化过程中, 决口可看成是一种分支现象, 在什么位置决口, 即选择哪个分支? 这将取决于这些分支的相对稳定性和涨落(扰动)的具体形式^[19~21]. 如果体系选择了其中某个稳定的分支(决口位置), 那么有限大小的涨落, 如突发洪水事件, 将继续保持其状态的稳定性沿 $A-O-O_1-O_2$ 分支发展(图 2). 当受到足够大的涨落时, 如河道分支淤浅后的突发洪水事件, 将破坏体系原先状态稳定性而发生决口, 沿着其他的分支 $A-O-O_1-O_2-O_3$ 发展. 当体系进一步远离平衡时, 一级分支 $A-O-O_1-O_2$ 已不能简单地控制其沉积体的时空自发行为, 而是通过更高级的分支现象、多个不同的不稳定决口分量的相互作用, 使体系呈现出更加复杂的时空行为, 各种不稳定的涨落分量(河道淤浅、突发洪水事件, 构造沉降、水平面变化等)的相互作用可能引起巨大的涨落, 最终导致整个沉积体的废弃而产生新的沉积体. 当决口对称而有序地出现时, 形成了沉积体的均匀对称生长模型, 但在许多情况下, 分支的不对称无序振荡导致了沉积体决口过程的非对称性无序状态, 使其各分支朵体产生不均匀生长, 最终形成了指状、朵状及鸟足状等一系列复杂多变的三角洲沉积体的外部形态.

2 分形模拟

传统的线性动力学方法在描述或模拟其生长过程时存在一定困难, 原因是它只能描述那些线性的、确定性的动力学过程, 虽然一些非线性系统可以用线性系统的近似方法建立微分方程组加以定量描述, 但大多数方程无法求解, 有的可能连微分方程(组)也无法列出. 这也是造成目前沉积动力学模拟失败的主要原因之一^[21]. 分形几何学的诞生和发展, 为我们提供了处理复杂非线性动力学问题的有效途径和方法^[22~26].

分形的大小和变化幅度预示着沉积体生长过程中的沉积背景信息^[5~9, 18, 19]. 这不仅表现在其形态特征上, 同时也表现在其内部结构的变化上. 钻井或测井资料所反映出来的沉积体内部结构信息同样具

有分形特征,并且沉积体内部各亚相的分形盒维数总比沉积体总体的分形盒维数小,由频繁砂泥岩互层组成的沉积层序的结构分维数往往较大,而这些层序大多是位于三角洲前缘或扇端的地区,这些地区由于靠近沉积水体,水动力条件变化大,造成了较为复杂的沉积体内部结构特征,反映了较强的非均质性.这也许是分形-地质统计学方法在描述沉积体内部结构非均质性方面取得成功的重要原因.

本文对沉积体的计算机模拟包括形态模拟和内部结构模拟二方面.采用的数学模型主要是分形插值模型和分形-地质统计学模型.

2.1 沉积体外部边界形态的分形模拟

在进行沉积体边界形态模拟时,选用的参数是:

- (1)沉积体边界形态曲线的盒维数 D ;
- (2)沉积体边界的控制点坐标 (x_i, y_i) , i 为控制点数(不少于 3 个),沉积体边界是砂体的尖灭线,或者是砂/泥百分比 $\leq 20\%$ 的曲线.以此为基础建立沉积体形态模拟的数据模型,具体步骤如下:(1)确定沉积体的边界形态曲线,该曲线经计算机扫描、矢量化后产生 *.wal 线文件;(2)计算机自动实施 *.wal 图形文件的盒维数 D 的计算;(3)根据资料详度选择不同尺度的网格坐标,建立数据模型;(4)建立数学模型:

$$W_n \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/N & 0 \\ C_n & d_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{n-1}{N} \\ f_n \end{bmatrix},$$

$$D = 1 + \frac{\lg \left[\sum_{n=1}^N |d_n| \right]}{\lg N}.$$

式中: $W_n (1 \leq n \leq N)$ 是具有特殊结构的仿射变换



图 4 冲积扇砂体平面形态模拟结果(过关键控制点)

Fig. 4 Modeling result of plane form of an alluvial fan sandbody

IFS, D 为分形插值函数的分维数, d_n 为相应的 IFS 变换中的矩阵值.显然,只要插值点的个数给定,可以通过调整 d_n 的值,使相关的分形插值函数的分维数任意接近 2 或 1(图 3,4).

2.2 沉积体内部结构参数的分形-Kriging 模拟

沉积体内部结构(如孔隙度、渗透率等)的数据模型包括平面和剖面两种.平面结构参数模拟数据的采集方法是:首先对研究区建立坐标系,然后读取各已知点的坐标 (x_i, y_i) 及相应的参数值,将这一系列数据点 (x_i, y_i, z_i) 输入计算机,即可实施平面结构参数的分形插值模拟.

井间非均质性插值模型或者井间结构参数预测模型建立的方法主要是对井间的结构参数(包括孔隙度、渗透率、饱和度、砂/泥百分比等)的数值变化进行分形-地质统计研究,用数值分形来表达它们在空间变化的复杂程度.井间剖面结构参数的采集方法是:将结构参数看作是时间与深度有关的一个时间序列,建立坐标系,将每一钻井所提供的结构参数-深度曲线或数据 $(\varphi-h, k-h, s_0-h)$ 等依次输入计算机,即可由计算机自动实施井间剖面结构参数的正则化 R/S 分析、分维数计算及分形-Kriging 模拟(图 5).具体步骤如下:(1)数据模型的建立.(2)结构参数分布模型的建立.如果某参数具有指数型的变异函数 $\gamma(h) = \sigma^2(h/\lambda)^{(2H-2)}$, h 为样点距离, σ^2 为标准方差, λ 为相关长度, H 为豪斯特指数,当 $h \geq \lambda$ 时, $r(h) = \sigma^2$,则井间结构参数预测的数学模型为:

$$W_P = \mu + \sum_{i=1}^{N_P} W_{P(i)} [W_i - \mu].$$

图 3 三角洲砂体平面形态模拟结果(2x2 网格)

Fig.3 Modeling result of plane form of a delta sandbody





图 5 一个分流河道砂体渗透率的井间分形-地质统计模拟结果

Fig. 5 Modeling result of fractal-geostatistics between wells of permeability about a distributary channel sandbody

式中: W_p 是点 P 的预测值, μ 是预测 W_p 时所用控制数据的平均值, $W_{P(i)}$ 是权重系数, W_j 是控制数据点, N_p 是控制数据的点数.

(3)测定结构参数的分维数 D : 首先用 R/S 函数计算各结构参数的豪斯特指数 H . R/S 方法是用来测试统计序列远程特性和远程相关存在与否的一种方法, 它主要是根据 fBm 和 fGn(分数高斯噪声)的顺序范围近似地服从 h^H 的相似定律而提出的. 当某一分布具有统计自相似时, 即满足 $2r(h) = V_h h^{2H}$, 则有:

$$R/S = ch^H.$$

对方程两边取对数: $\lg(R/S) = \lg c + H \lg h$, 只要作出 $\lg(R/S)$ 与 $\lg h$ 的交会图, 求出直线段的斜率即可得到 H . H 与分维数 D 的关系为: $H = d + 1 - D$, d 为维数. 然后, 在双对数坐标上将 V_h 与 h 投点作图, 求取 σ^2 和井间相关长度 λ_x .

$$V_h = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{N_j - jh} [W_{j(i)} - W_{j(j-jh)}]^2}{2 \sum_{j=1}^m (N_j - ih)},$$

$$\lambda_x = h [\sigma^2 / V_h]^{-1/(2H-2)}.$$

(4)进行井间结构参数的分形-Kriging 插值模拟.

3 模拟结果讨论

模拟的实例均选自我国内陆及近海中、新生代断陷盆地的扇形沉积体实体模型和实测数据模型, 形态模拟模型选择了三角洲和冲积扇, 结构模拟的原形模型选择一个分流河道的渗透率剖面.

3.1 河控三角洲朵体和冲积扇的平面形态模拟

模拟中选择了 0.5×0.5 , 1×1 , 2×2 等不同的网格控制点和关键控制点参数, 以便于比较分析. 模拟结果显示, 在 2×2 较大网格尺度及过关键控制点的情况下能较好地反映三角洲的总体形态特征, 盒维数的增大和减小对沉积体的总体形态模拟影响不大, 只是当维数增大时, 沉积体的边界形态结构变得更为复杂和细化(图 3, 4). 实际模拟中, 可以结合古流分析资料, 来判断某个朵体可能的生长方向, 然后通过调整 d_n (称为压缩比或垂直比例因子)的性质及数值来控制朵体的方向和规模, 同时可适当调整 d_n 的值以满足所给定的盒维数以便模拟更为复杂的沉积体边界形态. 此外, 模拟结果可能预示对形态较规则的扇形沉积体, 用较大的网格尺度就能实现对其整体外部形态的分形插值控制, 从而可有效地减少数据量和节约模拟时间.

3.2 平面孔隙度分布模拟

采用 Kriging 和分形-Kriging 2 种方法对一个三角洲砂体顶面孔隙度分布特征进行了模拟. Kriging 模拟结果表明, 2×2 网格能较好地反映孔隙度平面分布的内部变化特征, 3×3 网格能基本反映其总体变化趋势, 随机点数据模拟对其结构变化的总趋势有较好显示, 分形-Kriging 方法在模拟沉积体内部结构非均质性方面效果更好.

3.3 剖面渗透率的井间分形-Kriging 模拟

模拟的原形模型为一个分流河道砂体的剖面渗透率分布. 以 5 m 为水平间隔, 选取 0, 5, 10, 15, 20 这 5 个剖面数据, 进行了 Kriging 和分形-Kriging 模拟. 结果表明, 分形-Kriging 模拟较好地反映了沉积体内部各结构参数的变化特征及非均质性(图 5), 根据实际地质模型确定的分维数、水平和垂直方向的变程来模拟可以取得较为满意的效果. 而

Kriging 模拟只反映了剖面渗透率的总体变化特征. 通过不断改变水平和垂直方向变程的方法来模拟沉积体内部结构参数的非均质性特征效果会更好.

总之,与其他方法比较(如 Kriging 法),分形-地质统计学相结合的方法在模拟沉积体内部结构参数非均质性方面有一定优势,但反映内部结构参数的总体变化特征方面,Kriging 法似乎更清晰,实际应用中多种方法可互相补充.扇形沉积体的分形生长动力学模拟可能是实施沉积体形态模拟的一种重要途径.

感谢中国海洋石油总公司研究中心的大力支持和帮助.

参考文献:

- [1] 吴崇筠, 薛叔浩. 中国含油气盆地沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- [2] 丘东洲, 何治亮. 陆盆扇体沉积的形成机制及其油气意义[A]. 见: 中国石油学会石油地质委员会编. 碎屑岩沉积相研究[C]. 北京: 石油工业出版社, 1988.
- [3] 王寿庆. 扇三角洲模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [4] 王域辉, 廖淑华. 分形与石油[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- [5] 张一伟, 刘洛夫, 欧阳建平, 等. 油气藏多学科综合研究: 分形几何学在储层非均质性描述中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995. 184~190.
- [6] 周江羽, 吴冲龙, 毛小平, 等. 含油气盆地储层建模和模拟研究评述[J]. 地质科技情报, 1998, 17(1): 67~72.
- [7] 周江羽, 袁艳斌, 李星. 地学分形研究中值得注意的几个问题[J]. 地质科技情报, 1999, 18(2): 93~96.
- [8] 金强, 曾怡, 任怀强, 等. 两口井条件下的储层参数预测方法[J]. 石油实验地质, 1995, 17(1): 26~33.
- [9] Barton C C, LaPointe P R. Fractals in petroleum geology and earth processes [M]. New York and London: Plenum Press, 1995.
- [10] Hewett T A, Behrens R A. Conditional modeling of reservoir heterogeneity with fractals [J]. SPE Formation Evaluation, 1990, 5(3): 217~225.
- [11] Eivind D, Tiϕlwen C B. A two-stage stochastic model applied to a North Sea reservoir [J]. JPT, 1992, 44(4): 402~408.
- [12] 盖洛韦 W E, 霍布德 D K. 陆源碎屑沉积体系在石油、煤和铀勘探中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.
- [13] 李思田. 含能源盆地沉积体系[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996.
- [14] 克莱因 G deVries. 砂岩沉积模式与能源矿产勘探[M]. 李思田, 李宝芳, 林畅松译. 北京: 地质出版社, 1989.
- [15] 冯增昭, 王英华, 刘焕杰, 等. 中国沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- [16] 焦养泉, 李思田, 李祯, 等. 曲流河与湖泊三角洲沉积体系及典型骨架砂体内部构成分析. 武汉: 中国地质大学出版社, 1995.
- [17] 周江羽. 断陷盆地扇形沉积体的分形几何特征与计算机模拟[D]. 武汉: 中国地质大学, 1998. 24~25.
- [18] 张济忠. 分形[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [19] 程极泰. 混沌的理论与应用[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1992. 1~32.
- [20] 张卢侃, 孙建华. 混沌动力学[M]. 上海: 上海翻译出版公司, 1990. 1~156.
- [21] 吴冲龙, 张洪年, 周江羽. 盆地模拟的系统观与方法论[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1993, 18(6): 741~747.
- [22] 曾文曲, 王向阳. 分形的计算机模拟[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993.
- [23] Emanuel A S, Alameda G K. Reservoir performance prediction methods based on fractal geostatistics [J]. SPE Reservoir Engineering, 1989, 4(3): 311~318.
- [24] Yngve Aasum, Kelkar M G. An application of geostatistics and fractal geometry for reservoir characterization [J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6(1): 11~19.
- [25] 林克湘, 张昌民, 雷卞军, 等. 地面-地下对比建立储层精细地质模型[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [26] Scholz C H, Mandelbrot B B. 地球科学中的分形研究[M]. 刘祖荫, 皇甫岗, 崔增林译. 合肥: 中国科学技术出版社, 1991.

DYNAMIC MECHANISM AND FRACTAL SIMULATION OF GROWTH PROCESS OF FAN-SHAPED SEDIMENTARY BODIES

Zhou Jianguo¹ Wu Chonglong² Li Xing² Tian Yiping²

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Fan-shaped sedimentary bodies are important oil-gas accumulation bodies for the Mesozoic and Cenozoic oil- and gas-bearing basins in the inland and offshore of China. The quantified characterization of the spatial distribution pattern of the sedimentary bodies and that of the spatial variation principle of the inner structure parameters, are of important significance to the oil and gas exploration. The growth process of a fan-shaped sedimentary body is a complex nonlinear dynamic process. The analysis of the sedimentary dynamic, chaotic dynamic and fractal dynamic mechanisms of the growth process concludes that the growth process of the fan-shaped sedimentary bodies has fractal features. The crevasse process is an important cause for the complex and changing surface shapes of the sedimentary bodies. The fractal geometry theory will be relatively well applied to the quantitative modeling and simulation of the sedimentary bodies. The combination of fractal with geostatistics is applied to simulation the surface shapes and internal structures of the fan-shaped sedimentary bodies. In addition, a discussion of the simulation results is presented.

Key words: fan-shaped sedimentary body; sedimentary dynamics; chaos; fractal; geostatistics; computer simulation.

* * * * *

AAPG 1998—1999 年荣誉巡回讲学首次在武汉举行 ——著名层序地层学家 Henry W. Posamentier 博士 在中国地质大学(武汉)进行学术交流

陈开远 王 华

(中国地质大学资源学院, 武汉 430074)

应资源学院陈开远、王华教授的邀请, 世界最著名的层序地层学家之一、ARCO 印度尼西亚公司勘探总监 Henry W. Posamentier 博士于 1999 年 11 月 18 日至 20 日来中国地质大学(武汉)进行了 AAPG 荣誉巡回讲学。

中国地质大学(武汉)姚书振副校长代表大学对 Henry W. Posamentier 博士的武汉之行表示热烈欢迎, 资源学院安排了学术讨论活动, 校国际合作处给予了积极的协助, 数十名教授、副教授与博士、硕士

研究生参加了本次学术活动, 并与 Posamentier 博士讨论了陆相沉积盆地中的层序地层学模式等问题。

Henry W. Posamentier 博士 1976 年毕业于美国纽约的 Syracuse 大学, 并获博士学位, 自 1979 年起, 先后在埃克森 (EXXON)、埃索 (ESSO) 和阿科 (ARCO) 等世界最大的石油公司任职, 曾担任勘探地质学家、资深研究监督等职, 是当今石油地质、层序地层学界最著名的学者之一, 著有“硅质碎屑岩层

(下转 50 页)