

文章编号: 1000-0550(2000)01-0095-05

扇形沉积体生长的分形几何特征分析^①

周江羽¹ 刘常青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 武汉 430074)

摘要 扇形沉积体是我国内陆及沿海地区中、新生代含油气盆地中的重要油气勘探目标,对其平面分布形态和内部结构参数特征的定量表征是油气勘探部门极为关注的问题。随着分形几何理论在沉积学领域应用的日趋广泛,使人们可从新的角度来考虑这一问题的解决方法。扇形沉积体的生长是一个复杂的非线性动力学过程,且具有分形特征。分维数的大小反映了沉积体外部形态和内部结构的复杂程度,分维数的变化幅度预示着构造和沉积背景的某些信息。将分形和混沌理论相结合,也许是实施扇形沉积体非线性动力学建模和模拟的重要途径之一。

关键词 扇形沉积体 分形 分维数 非线性动力学 分形模拟

第一作者简介 周江羽 男 1963年出生 博士后 副教授 沉积学和盆地分析

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

目前,我国石油勘探所面临的一个重要问题是:由于边远和沿海地区钻探成本极其昂贵,怎样以少量的钻探投入获取更多的盆地油气地质信息,尤其是储集体的空间分布规律及内部结构参数变化的信息,已成为勘探部署及提高油气采收率的关键问题。多年来的油气勘探实践表明,含油气盆地作为一个复杂的开放系统,其地质过程大部分不是有序的、稳定的、平衡的和确定性的,而是包含了从无序到有序、从有序到混沌的转变,并存在着复杂的非线性过程。在非线性过程里,随机性和复杂性是其重要特征,但同时又存在着某种规律性^[1,2]。分形几何和混沌理论的发展,使人们能以新的观念、新的手段来处理这些难题,透过无序的混乱现象和不规则形态,去揭示隐藏在复杂现象背后的规律、局部和整体之间的本质联系^[3-5]。九十年代以来,分形理论已经在油藏地质模型建立、地震和测井资料处理、储层非均质性描述等诸多领域取得了重要成果,并逐渐向沉积学领域渗透,显示了旺盛的生命力^[5-11]。

1 分维数的测定方法

分形研究的是所谓统计意义上的自相似性和在一定尺度范围内的自相似性(标度不变性)。它是用分形维数 D 来描述和量化具有分形的研究对象的

复杂程度的。考虑到扇形沉积体的平面分布和内部结构特点,采用盒维数来描述其分形几何特征较为快捷、方便和实用。盒维数的定义为:

$$D_0 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(\delta)}{\ln N(1/\delta)}$$

式中: δ 为覆盖扇形沉积体的正方形网格的尺寸; $N(\delta)$ 为包含沉积体边界的网格数目。逐次改变 δ 的值,便可得出一系列对应的数据 $N(\delta)$, 这一系列 δ 和 $N(\delta)$ 数据在 $\ln N(\delta)$ 对 $\ln(1/\delta)$ 的双对数图上得到一系列点,对其作最小二乘拟合后,对应的直线斜率即为研究对象的盒维数 D_0 。

上述计算过程可在计算机上自动实现。

2 扇形沉积体的生长动力学过程

扇形沉积体包括冲积扇、扇三角洲、水下扇、决口扇及三角洲等一系列外形呈扇形分布的陆源碎屑沉积体类型。它的形成和演化受到盆地构造和沉积背景的双重控制,由于受益缘断裂的活动、盆地沉降、气候、物源和水动力等诸多因素的制约,扇形沉积体的形状和内部结构复杂多变^[12-19]。但就其外部形态而言,除了边界形态复杂多变以外,仍然保持着整体的扇形特征,内部结构则主要表现在砂、泥岩

① 中国海洋石油总公司研究中心 9618 课题资助

收稿日期: 1998-10-22 收修修改稿日期: 1999-06-25

层厚度和内部结构参数的不均一性方面。

实际上,当我们具体考察一个扇形沉积体的生长过程后可以发现,它是由一系列相互叠置的沉积体构成的,有时一次水流事件可以形成一个扇形朵体。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,决口和废弃完全是随机的、不确定的,这也是造成其外部形态和内部结构复杂多变的重要原因。从混沌论的观点出发,决口可以看成是一种分支现象,何时何地决口将取决于这些分支的相对稳定性和涨落的具体形式,生长—决口—废弃的动力学过程处于一种非线性动态平衡状态,一旦这种平衡被破坏,就可以出现朵体新的决口和废弃。由于决口和废弃过程的非对称性,造成了大部分扇形沉积体的非对称生长方式,最终形成了指状、朵状及鸟足状等一系列复杂多变的扇形沉积体外部形态^①。

3 形态分形特征

为了分析沉积体平面形态的分形几何特征,作者收集了大量国内外古、今沉积体的形态分布资料^[12~20],勾绘了各种扇形沉积体的平面形态分布图(即沉积体的边界形态图)。

通过大量统计试验表明,在实际的分形维数测定中,分维数的测量值与分形的结构层次(即码尺)有关,即实际存在的分形体不具有无限层次的自相似结构,仅在一定层次范围内(无标度区)表现为分形(可称之为有限分形),码尺应在分形体最大直径的30%~80%范围内取值。在具体计算时,统一采用15、48、96、160、200这五个不同的网格比例系数进行拟合来求取形态盒维数。

为研究沉积体整体边界形态与局部边界形态的自似性问题,可以从整体形态中提取局部形态(称为形态因子 IFS)加以研究,并测定其分维数,这种局部形态的分维数称为结构维数 D_i ,它的值总比整体形态的分维数 D_s 要小。通过对近 40 个扇形沉积体平面形态的分维数统计分析,其平均构造维数 D_s 为 1.226 3,平均结构维数 D_i 为 1.108 6。

在实际的盆地勘探过程中,早期阶段我们所利用的资料是有限的,这就需要进行广泛的类比,建立扇形沉积体的类比模拟模型。实际资料的统计结果表明,在扇形沉积体中,根据形态的自相似性程度,可划分为简单扇形体和复杂扇形体。简单扇形体包括冲积扇、扇三角洲和水上扇,分维数较稳定,一般在 1.139 0~1.194 3 之间,复杂扇形体主要是指河控三角洲沉积体,分维数常在 1.185 3~1.400 0 之间,变化幅度较大。

任何沉积体在发育过程中,由于受到构造和沉积条件的影响(如构造活动、物源供应、水动力条件变化等),其局部形态、大小和内部结构都将发生变化,同时还存在着沉积体的不断生长、迁移甚至废弃的过程。但其整体形态在演化过程中表现出较好的自相似性,其分形生长维数也在相应变化,且随沉积体的不断生长,其维数也在逐渐增大(图 1,表 1)。上述扇形沉积体的分形计算结果表明,河控三角洲的分维数要大于扇三角洲和冲积扇的分维数,表明三角洲发育环境的水动力较扇三角洲和冲积扇要复杂,平面形态也相对复杂一些。生长维数不断增大的趋势,可能预示着其演化过程中的形态变得越来越复杂,决口扇的生长维数变化幅度不大,可能代表了一种较稳定、持续的水动力条件和快速堆积的沉

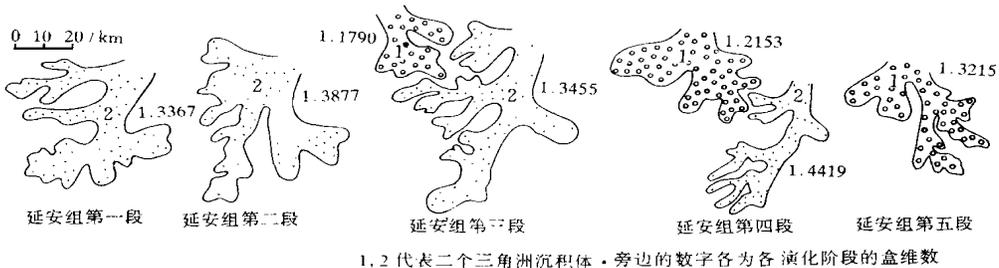


图 1 鄂尔多斯盆地神木地区延安组(J_{2+3y})三角洲沉积体的分形生长模型

Fig. 1 The fractal growing model of delta sedimentary body in Yanan Formation(J_{2+3y}) in Shenmu area of Ordos basin.

① 周江羽. 断陷盆地扇形沉积体的分形几何特征和计算机模拟. [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 1998

表 1 三角洲和决口扇生长模型的分形维数(盒维数)

Table 1 Fractal dimension (box-dimension) of the growing model of delta and crevasse-splay

沉积体名称	分形生长维数						均盒维数(D)
	1	2	3	4	5	6	
密西西比三角洲库比茨决口扇	1.2624	1.2797	1.2984	1.3225	1.3253	1.3122	1.3001
洱海弥苴河三角洲(鸟足状)	1.1037	1.1105	1.1743	1.3069	1.3511	1.4019	1.2414
长江三角洲(浪控)	1.2330	1.2602	1.2245	1.2217	1.2159		1.2311
鄂尔多斯延安组三角洲 1(河控)	1.3132	1.3530	1.1892	1.2508	1.2917		1.2796
鄂尔多斯延安组三角洲 2(河控)	1.3367	1.3877	1.3455	1.4419			1.3780
鄂尔多斯延安组三角洲 3(河控)			1.1790	1.2153	1.3215		1.2386

积环境。沉积体形态的分形模拟可按下列步骤进行:

- (1) 建立沉积体平面形态分布图, 对其边界形态曲线计算盒维数 D ; 沉积体边界可看作是砂体为 0 的界线, 或者是砂/泥百分比 $\leq 20\%$ 的曲线;
- (2) 建立沉积体边界的控制点坐标 (x, y) , 坐标原点可任选, 控制点数不少于 3 个;
- (3) 根据勘探程度及资料详度选择不同的模拟网格尺度, 建立模拟的数据模型;
- (4) 实施沉积体形态的分形插值模拟(图 2)。

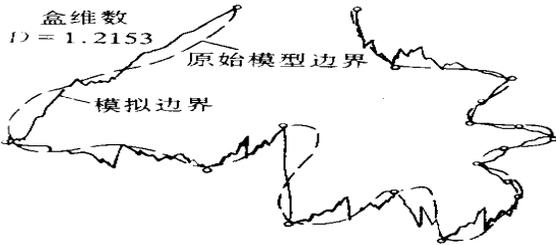


图 2 一个三角洲砂体平面形态的分形插值模拟结果(过关键控制点)

Fig. 2 Fractal modeling of morphology of a delta sandbody (passing the key control points)

4 结构分形特征

沉积体的结构是指组成沉积体物质的成分、大小、形状及其空间组合特征, 它的变化是造成其物性特征变化的最主要的原因, 也是油藏描述中迫切需要解决的问题之一^[5, 10-11]。我们可以将沉积体的物性参数(包括孔隙度 Φ 、渗透率 K 和饱和度等)看成是一系列与时间序列有关的点的集合, 这些点的集合构成了一个函数 $f(t)$, 同时构筑坐标系: 以时间 t 或深度为纵坐标, 以参数值为横坐标。在纵坐标宽度为 δ 的区间上面的柱集内与 f 的图相交的网

正方形个数近似等于 f 的变化范围, 不断改变 δ 的宽度, 就可以得到一系列覆盖 f 的网格数, 对这些个数求和就可得到 f 图的盒维数的估计值(图 3)。

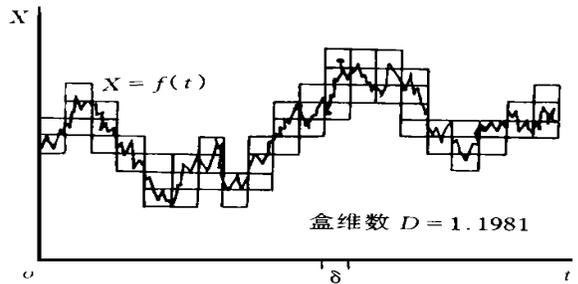


图 3 沉积体内部结构参数的分维数测定(据张济忠, 1995 修编)

Fig. 3 Fractal dimension measure of inner structure parameters of sedimentary body (modified from Zhang Jizhong, 1995)

经过大量实例的统计分析, 沉积体结构参数分维测定的码尺统一选取为: 5, 10, 30, 40, 60; 对一些典型断陷湖盆扇形沉积体的测井曲线(自然伽马 γ , 视电阻率 ρ 及自然电位 s_p 等)的分维数计算结果表明, 沉积体总体结构的平均维数一般在 1.25 ~ 1.45 之间, 各亚相总体结构的平均维数一般在 1.15 ~ 1.3 之间, 且内部结构较复杂的亚相, 如扇端辫状河道、三角洲分流河口坝的分维数明显要高于其它亚相, 反映了维数的大小与亚相内部结构的非均质性程度有重要关系(表 2)。

对沉积体物性参数的非均质性描述, 可以在对其孔隙度、渗透率、含油、水饱和度曲线的维数测定的基础上, 建立单井及井间剖面物性参数分形几何模型, 然后进行 R/S 分析, 通过分形——地质统计学的方法进行模拟^[2, 5-11](图 4)。

5 几点认识

分形理论在油气地质领域的应用日渐广泛, 扇

表2 扇形沉积体及各亚相内部结构参数的平均盒维数

Table 2 Average box-dimension of inner structure parameters of fan-shaped sedimentary bodies and its subfacies

沉积体	亚相	自然伽马测井曲线(γ)	电阻率测井曲线(ρ)	$D\gamma$	$D\rho$
冲积扇	泥石流		1.1464 ~ 1.2265	1.3759	1.4530
	扇中辫状河道	1.3042	1.3204		
	扇端席状砂	1.3122	1.1393		
	漫流	1.2851	1.3042		
扇三角洲	前缘	1.1970 ~ 1.2360			1.2526
	前三角洲	1.1442 ~ 1.2334	1.2793 ~ 1.3726		
三角洲	分流河口坝		1.2541		
	水下分流河道		1.1386		1.3508
水下扇					1.2588

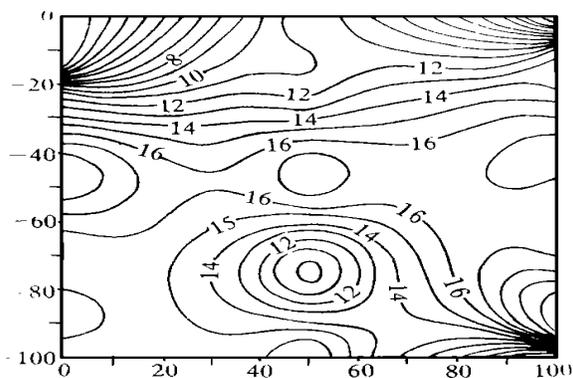


图4 一个三角洲砂体平面孔隙度分布的井间分形-Kriging模拟结果(水平、垂直变程均为1/2)

Fig. 4 Fractal-Kriging modeling of plane porosity distribution between wells of a delta sandbody

形沉积体作为油气勘探的重要目标,对其作分形几何特征的分析,是作者将非线性动力学理论应用于沉积学领域研究的一种尝试。通过本文的研究,得出如下几点认识:

(1)分形在沉积学领域有着广泛的应用前景。

扇形沉积体的生长过程是一个复杂的非线性动力学过程。利用常规线性动力学理论的思路和方法已无法客观、准确地描述沉积体形成和演化这一复杂的动力学过程,并导致了对其建模和模拟方面的一系列困难。分形几何学理论的产生和发展,为解决这一问题提供了新的手段。

(2)扇形沉积体的生长具有分形特征。可以通过计算机自动实施对其形态和内部结构参数的分形盒维数计算,平面形态的平均分形盒维数为1.1~1.4之间,内部结构参数的总体平均盒维数为1.25

~1.45之间。维数的大小反映了沉积体外部形态和内部结构的复杂程度,维数的变化幅度可能预示着构造和沉积背景的某些变化信息。

(3)对扇体沉积体分形几何特征的研究,为建立其分形生长的动力学模型,并提供一种描述自然界中不规则形态自相似性的合适数学框架,为最终实施沉积体的非线性动力学模拟奠定了基础。为定量描述和表征不同勘探阶段、不同资料详度油气勘探区的沉积体平面分布规律和内部结构特征提供了重要的预测手段。

(4)将分形几何理论与混沌理论相结合,通过广泛的类比,具体研究各扇形沉积体生长的非线性动力学过程,并建立其相应的动力学模型,利用分维数及适当的控制点参数,用计算机客观模拟其动态生长过程,也许是最终再现沉积体形态动态演化过程的重要途径之一,这有待于沉积学家、数学地质学家和计算机专家共同努力。

感谢中国海洋石油总公司研究中心的大力协助。

参 考 文 献

- 1 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,1993,(6):741~747
- 2 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,(1):67~72
- 3 Sholz C H, MaudeLrot B B.地球科学中的分形研究[M].刘祖荫,皇甫岗,崔增林译.北京:中国科学技术出版社,1991
- 4 张济忠.分形[M].北京:清华大学出版社,1995
- 5 王域辉,廖淑华.分形与石油[M].北京:石油工业出版社,1994
- 6 Barton C C, LaPointe P R. Fractals in petroleum geology and earth processes[M]. Plenum Press, New York and London, 1995

- 7 Emanuel A S, Alameda G K, *et al.* Reservoir Performance prediction methods based on fractal geostatistics[R]. SPE Reservoir Engineering August, 1989. 311 ~ 318
- 8 Hewett T A, Behrens R A. Conditional modeling of reservoir heterogeneity with fractals[R]. SPE Formation Evaluation, September, 1990. 217 ~ 225
- 9 Yagve Aasum, Kellkar M G, *et al.* An application of geostatistics and fractal geometry for reservoir characterization[R]. SPE Formation Evaluation, March 1991. 11 ~ 19
- 10 张一伟, 刘洛夫. 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
- 11 林昌相, 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
- 12 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
- 13 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: 碎屑岩沉积相研究[C]. 北京: 石油工业出版社, 1988
- 14 盖洛韦, W B, 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
- 15 李思田主编. 含能源盆地沉积体系[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996
- 16 Whipple K X, Trayler C R. Tectonic control of fan size: the importance of spatially variable subsidence rates[J]. Basin Research 1996, 8: 351 ~ 366
- 17 王寿庆. 扇三角洲模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993
- 18 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
- 19 中国石油学会石油地质专业委员会编译. 国外浊积岩和扇三角洲研究[C]. 北京: 石油工业出版社, 1986
- 20 Reading H G 主编, 周明鉴, 陈昌明, 张疆等译. 沉积环境和相[M]. 北京: 科学出版社, 1985

Fractal Features of Fan-Shaped Depositional Bodies

ZHOU Jiang-yu¹ LIU Chang-qing²

1(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640)

2(China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract

Fan-shaped depositional bodies are those mainly composed of terrigenous coarse deposits and fan-shaped in morphology, including alluvial fan, fan delta, delta and subaqueous fan and so on. They are important exoil-gas targets in oil and gas-bearing basins in Mesozoic and Cenozoic interior and offshore in China, which are the problems deeply concerned with by oil-gas exploration department to show quantitatively the features of their morphological distribution and inner structure parameters.

Recent researches on fan-shaped bodies are results combining static, qualitative and megascopic methods with dynamic, quantitative and microscopic approaches. Great efforts were made in quantitative modeling and in simulating of structural parameters of sedimentary bodies, but there have been still few of published documents about how to build morphological and simulating models of sedimentary bodies up to now.

With fractal theory applied widely to sedimentology, it may be considered from a new point of view to solve the problems. The growing of fan-shaped depositional bodies is a complex nonlinear dynamics process and a fractal. Fractal dimension may reflect the complexity of their outer morphology and inner structure, and predict some information about tectonic and depositional setting. It will be one of the most important ways to realize nonlinear dynamics building models and simulation of depositional bodies combined fractal with chaos theory.

On the bases of analyses of sedimentological features of more than twenty faulted basins at home and abroad, the paper probes the growing dynamic process of fan-shaped depositional bodies, summarizes their fractal features, and establishes the model of shape fractal growing and structural fractal. The structural fractal box dimensions are determined. Simulations of morphologies of the fan-shaped bodies are made by fractal, and of their structures by fractal-Kringing. The main conclusions are as follows:

(Continued on page 106)

grams for Carboniferous sandstones give the same results as the major element composition plots.

It can be seen that the source area of the Carboniferous strata is from underlying middle Tianshan microplate composed of a great deal of volcanic rocks of island arc type and intermediate—acid granite. So, the Carboniferous strata are formed in the foreland basin resulting from the collision between middle Tianshan microplate and southern Tianshan back—arc basin. The evolution of Tianshan microplate shows that the opening of paleo—Tianshan Ocean starts from Sinian—early Ordovician. With the opening of paleo—Tianshan Ocean, the middle Tianshan microplate shifts from the Tarim plate. The opening of southern Tianshan back—arc basin results from the subduction and collision in the northern margin of middle Tianshan microplate. The collision between Tarim plate and middle Tianshan microplate results in the closure of the southern Tianshan back—arc basin. The collision, also called as soft collision, does not make the southern Tianshan uplift abruptly. The sea water in the research area and southern Tianshan does not retreat until the early Carboniferous. So, there is devoid of sediments during the early Yanguan stage. With the transgression of Carboniferous, southern Tianshan accepts the sedimentation during the late Yanguan stage, but the research area during the late Datang stage. After a short time of sedimentation, the research area uplifts.

Key words Carboniferous tidal—flat and lagoon facies major element and trace element composition framework grain foreland basin

(Continued from page 99)

1. Fan—shaped sedimentary bodies are complex nonlinear systems. Their forming processes are both a depositional dynamics of growing, crevassing, abandoning and a complex stochastic, nonlinear dynamics. Crevasses can be viewed as a kind of bifurcation and fluctuation; the choice of branches and the interaction of the fluctuation quantities are the important causes to form the complex and various morphological features and inner structures of fan—shaped bodies.

2. The box dimension of morphology fractal of a fan—shaped body is generally 1.1—1.4, that of structure fractal is generally 1.25—1.45.

3. The different box dimensions show different tectonic and depositional setting. Fractal dimensions represents the structural anisotropism of sedimentary bodies.

4. Fractal—Kriging proves to be useful method for modeling morphology and inner structures of sedimentary bodies, it can better reveal the local features and anisotropic change in the bodies by adjusting fractal dimension D , horizontal and vertical range.

Key words fan—shaped depositional body fractal dimension nonlinear dynamics fractal-kriging simulation