

断层体系的分形维数及其对深源气运移条件的指示作用

徐景祯 刘晓冬 陈章明 申印章

(大庆石油学院 黑龙江安达 151400)

提 要 本文根据分形理论计算了松辽盆地北部大庆长垣以东地区 T_2 、 T_3 、 T_4 反射层不同区域内断层体系的计盒维数和信息维数,通过对各区断层体系分维特征的分析,发现断层体系分维高值区域与深源气藏的分布存在较好的对应关系,这不仅表明断层是该区深源气的主要运移通道,同时也表明断层体系分维特征是定量描述深源气运移、聚集条件的一个重要参数。

关键词 分形 分形维数 断层体系 深源气藏 运移条件

第一作者简介 徐景祯 男 31岁 讲师 博士研究生 油气资源评价和计算机应用

分形几何(Fractal Geometry)是70年代由法国数学家 Mandelbrot^[1]创立的一门研究自然界中不规则形体的表现及其内在规律性的非线性科学。由于其研究对象的广泛性,目前正日益深入于自然科学和社会科学的各个领域。其中在地质领域内,分形几何学已被应用于储层非均质性描述、地震时空分形结构分析和油气预测以及孔隙结构分形描述等方面^[2]。

油气运移和聚集是油气成藏机理研究中的一项重要内容,也是一个世界性的难题。事实证明,断层在油气运移聚集过程中起着重要的控制作用,特别是对于深源气的运移和聚集。为了量化地研究断层体系对油气运移和聚集的控制作用,本文将分形几何理论应用于断层体系分形特征研究,并分析了松辽盆地北部大庆长垣以东地区不同单位的分形维数及其与深源气藏的运移和分布的关系。

1 断层体系的分形维数及其计算

1.1 断层体系的自相似特性

所谓分形(fractal),是指自然界中不规则、无限复杂的几何形体,其内部存在着局部与整体的自相似性,它揭示了不规则形体的内在规律性。用于描述分形结构复杂程度的定量参数是分形体的维数,它不同于拓扑维数,一般为分数,所以又简称分维。

沉积盆地是一个复杂的非线性动力系统,断层

形成则是该系统中岩石受地应力作用产生破裂和发生位移的一种重要的构造地质现象。断层的级别有大有小,即三级断层是一二级断层的派生断层,四级断层又是三级断层的次级派生断层。即使在最低级别断层附近,也发育有不同尺度的裂缝。在任何一个由各级断层和裂缝构成的断层体系内,不同级别的断层(或裂缝)之间在空间分布上存在着统计意义上的自相似性,即在一定比例尺下的所有断层的集合(断层体系)具有分形特征。这就为应用分形理论研究断层体系及其对深源气运移的控制作用提供了前提。

1.2 断层体系分维值的计算

从数学观点来观察断层的空间展布特征,断层体系实质上是由一系列的无规则的线状或面状几何体组成的集合。由于断层体系具有分形特征,因此,可以按分形几何学方法定量地求得反映分形体空间分布复杂性的参数——分形维数。

分形维数的计算方法很多,本文采用了盒式维数法和信息维数法。

1.2.1 盒式维数法

盒式维数又称计盒维数,即以边长为 L 的二维正交网格(盒子)去覆盖各反射层不同区域上断层系所在的二维平面,在不断改变尺度 L 的情况下,分别测量出各反射层不同子区域上断层系内包含有断层的方格数目 $N(L)$,若 $N(L)$ 与 L 满足如下幂律关

系:

$$N(L) = C \cdot L^{-D} \quad (1)$$

则 D 为断层体系的盒式维数,在实际计算中可用最小二乘法拟合测量出的一系列 $(L, N(L))$ 数据

$$\lg[N(L)] = a + b \lg(L) \quad (2)$$

则由直线斜率 b 可求出盒式维数,即盒式维数 $D_0 = |b|$ 。

1.2.2 信息维数法

盒式维数定义中仅考虑了有断层进入的盒子数,而未考虑一个盒子内所包含的断层条数。信息维数既考虑到了盒子内是否有断层穿过,同时也考虑了盒子内的断层条数。断层体系的信息维数的定义为:

$$D_1 = - \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sum P_i \ln(1/P_i)}{\ln r} \quad (3)$$

式中, P_i 为断层落入第 i 个边长为 r 的盒子内的概率。

令 n_i 为第 i 个边长为 r 盒子内的断层条数, N 为盒子总数,则这一概率为

$$P_i(r) = n_i / \sum_{i=1}^N n_i \quad (4)$$

令 $I_q(r) = -\sum P_i \ln(1/P_i)$, 用实测的一系列 $(I_q(r), r)$ 值,通过最小二乘法拟合求得 $I_q(r)$ 与 $\ln r$ 之间的线性关系:

$$I_q(r) = -D_1 \ln r + I_0 \quad (5)$$

则可由直线斜率求出信息维数 D_1 。

2 松辽盆地北部大庆长垣以东地区深源气的分布

2.1 研究区地质概况

研究区位于松辽盆地中央拗陷区北部大庆长垣以东,面积约为 $1.05 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。构造上以三肇凹陷为中心,南部为朝阳沟阶地和长春岭背斜带,北部为宋站鼻状构造,东部为尚家鼻状构造,该区是松辽盆地北部深部天然气勘探程度最高的地区,区内环三肇凹陷分布有汪家屯、羊草、宋站等11个气田组成的中小型气田群,其中大部分气田的产气层为泉头组三、四段的扶余、扬大城子油层。

通过气源对比分析,本区的天然气来自深部徐家围子、安达和莺山断陷侏罗系及登娄库组泥岩。断裂是该区天然气运移的主要通道,天然气主要通过从 T_5 反射层断至 T_2 反射层或从 T_4 反射层断至 T_2 反射层的断层向上运移。封盖深源气藏的区域盖层

为青山口组泥岩层,局部盖层为泉头组、登娄库组及上侏罗统的泥岩层。

该区断裂极为发育,多为近南北向正断层。据统计,断穿 T_5 、 T_3 、 T_2 反射层的断层分别有663条、886条、4230条。研究区内发育有三条北北东向的大断裂带,是一个切穿基岩顶面并在侏罗白垩纪时期具有继承性活动的带状断裂系统。本区已发现的油气田均沿三大断裂带和其两侧分支的二级断裂带分布。

2.2 断层体系子区域的划分

如前所述,天然气主要通过断穿 T_5 — T_2 或 T_4 — T_2 的断层垂向运移,为了研究断层体系的分维特征及其与深源气藏分布的关系,首先根据 T_2 、 T_3 、 T_4 三个地震反射层构造图绘制了相应反射层断层体系平面分布图。然后根据本区四个含气带的位置以及三大断裂带对油气的控制作用,将研究区断层体系划分为八个子区域(图1)。其中I区为汪家屯—宋站—升平含气区;II区为尚家—肇东无油气区;III区为榆树林—徐家围子—尚家含油区;IV区为长春岭—五站—四站—三站含气区;V区为宋芳屯—模范屯—头台—茂兴含油区;VI区为昌德含气区;VII区为昌德北部无油气区;VIII区为双城无油气区。

3 断层体系的分维对深源气运移条件的指示作用

3.1 断层体系分维特征

在对断层体系进行子区域划分的基础上,应用盒式维数法和信息维数法对各反射层不同区域上的断层体系分维值进行了计算,结果见表1。在应用盒式维数测量各反射层不同区域上断层体系包含有断层的盒子数目 $N(L)$ 时, T_2 反射层尺度 L 的取值分别为1,2,3,4,5 km; T_3 和 T_4 反射层 L 取值分别为0.5,1,1.5,2,2.5,3,4 km。 T_3 反射层IV区域上 $\lg[N(L)] \sim \lg(L)$ 的拟合直线见图2。在应用信息维数法测量 T_2 反射层不同区域盒子内含有的断层条数 n_i 时,尺度 r 的取值与盒式维法尺度 L 的取值一致, T_2 反射层I区域上 $I_q(r) \sim \lg(r)$ 的拟合直线见图3。从图2和图3可以看出 $\lg[N(L)]$ 与 $\lg(L)$ 及 $I_q(r)$ 与 $\lg(r)$ 之间都具有非常好的线性关系,并且盒式维数和信息维数都大于其拓扑维数1,这也进一步验证了断层体系的自相似性,即不同区域内断层体系具有良好的分形特征。

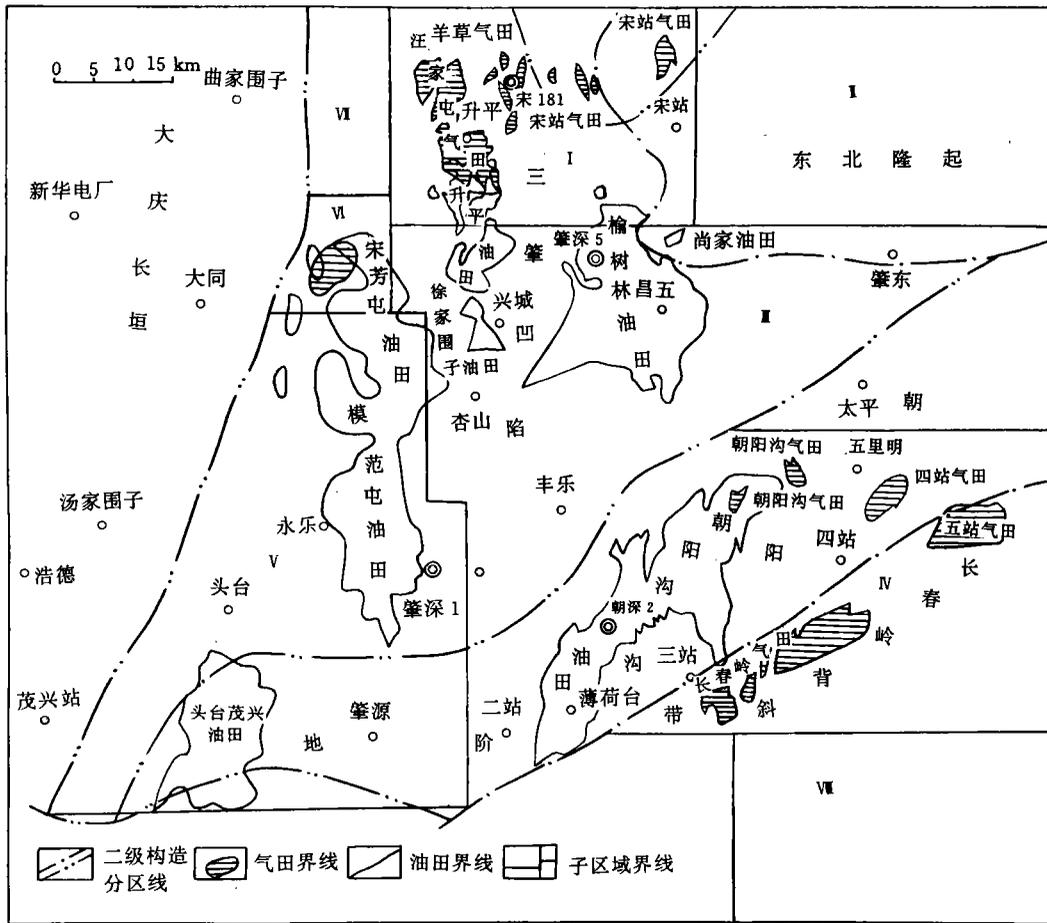


图1 大庆长垣以东地区油气田位置及研究区域划分图

Fig. 1 Distribution of gas fields in the studied area

表1 T_2 、 T_3 、 T_4 反射层不同区域断层体系分维值Table 1 Fractal dimensions of the T_2 、 T_3 and T_4 horizons in different zones

分维 反射层	分区	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
T_2	盒维数 D_0	1.8317	1.6884	1.7650	1.8086	1.7321	1.9106	1.8042	1.6197
	信息维数 D_1	1.7994	1.6891			1.7300		1.8286	
T_3	盒维数	1.3717	1.2614	1.5866	1.5798	1.2655	1.2950	1.2597	
T_4	D_0	1.1943	1.1111	1.2037	1.3829	1.0674	1.1844	0.9212	

由表1可以看出,纵向上总体表现为 T_2 、 T_3 、 T_4 反射层断层体系分维值逐渐减小,这种分维值特征体现了该区断层体系纵向上复杂性的变化规律和相应时期构造运动的强弱程度。

3.2 断层分维值与气藏分布的关系

由表1可以看出,同一反射层上气田分布区断层体系的分维值要明显大于无气区,在 T_2 、 T_3 、 T_4 反射层上均表现出这种特征,因此可以肯定这种规律

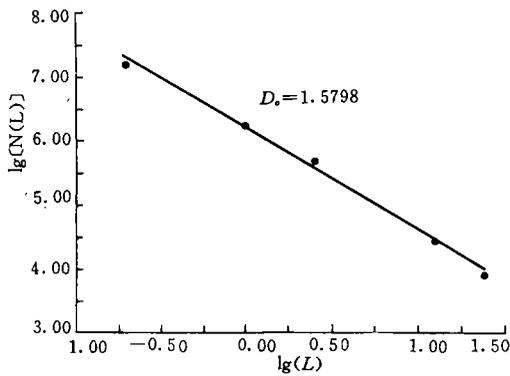


图2 T_3 反射层Ⅳ区域 $\lg(N(L)) \sim \lg(L)$ 关系图
Fig. 2 Relationship between $\lg(N(L))$ and $\lg(L)$ in Zone Ⅳ of the T_3 horizon

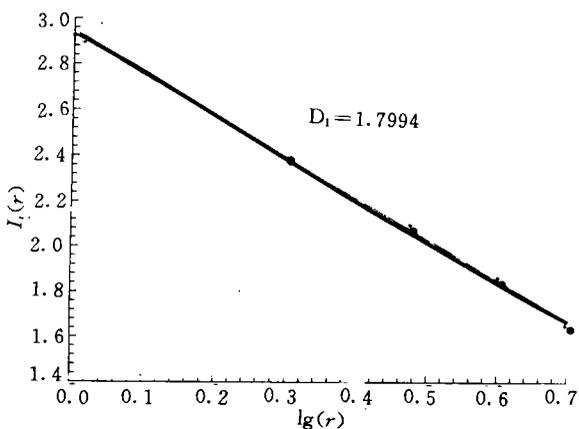


图3 T_2 反射层Ⅰ区域 $I_q(r) \sim \lg(r)$ 关系图
Fig. 3 Relationship between $I_q(r)$ and $\lg r$ in Zone Ⅰ of the T_2 horizon

存在的客观性。断层体系分维值高,说明断层体系空间分布复杂程度大,深源气向上运移的通道条件好,因此,在气田(藏)分布区断层系分维值显示高值,这与本区气田均沿大断裂带和二级断裂带分布相吻合。而断层系分维值低,说明断层系空间分布复杂性小,断层为深源气运移没有提供良好的通道条件,因此,断层系分维值低的区域不利于深源气的运移和聚集。

值得注意的是,在昌德北部无气区, T_2 反射层上断层系分维值很高(D_0 和 D_1 分别为 1.8042 和 1.8286),主要原因是该区位于古中央隆起带上,断裂十分发育,断层复杂程度高,因此分维值显示高值。但该区距有利生气区徐家围子断陷较远,气源不足,并且储层为孔渗性很差的致密砂岩,天然气侧向运移也很微弱,因此,该区虽然断层系分维为高值,

但目前仍未有油气田发现。

此外,研究区内总体上气区断层系分维值高于油区,油区的断层系分维值又高于无油气区,这一特征在 T_2 反射层反映最明显,气区断层系分维值为 1.8~2.0,油区为 1.7~1.8,无油气区为 1.6~1.7。这说明作为油气的运移通道,同等条件下断层对气比对油更有利于流体的运移。

另外需要说明的是,有些区域尽管断层系包含有断层的数目很少,分维值却很高(例如 T_2 反射层的Ⅳ区),说明断层体系分维只与断层体系空间分布复杂程度有关,而与断层条数无关,这也正是断层体系分形体具有自相似性的良好体现。事实上,由于地震勘探精度的影响,使一些级别很低的断层在构造图上无法反映,因此,在用正交网格去覆盖时则认为无断层存在,实质上这些小断层对断层体系分维大小仍然起作用,只是测量上存在困难而已。

此外,由于大庆长垣以东地区勘探程度较高,地震测网密度基本在 $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km} \sim 0.5 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 之间,个别地区为 $1 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 。在这种勘探程度下,各反射层的断层识别是比较充分的,并且研究区内各子区域的地震勘探程度差异不大,因此可以说各子区域的断层分形维数是一个客观存在的数值。事实上,由于断层体系的分形维数只反映断裂分布的复杂程度,而与断层的条数无关,因此同一区域在较低勘探程度时由规模较大的断层计算出的分形维数与勘探程度较高时由更详细的断层分布计算出的分形维数值应是一致的。这也是分形中自相似性的基本要求,即用不同的尺度度量一分形体的复杂性时,应得到一个确定的复杂性指标一分形维数。否则在 $\lg(N(L)) \sim \lg(L)$ 关系就不可能显示为一条直线(图 2、3)。这也从理论上说明了断层体系的分形维数是与勘探程度无关的。

平面上所划分的 8 个子区域中的Ⅰ区、Ⅳ区和Ⅵ区在 T_2 、 T_3 、 T_4 三个反射层上断层系都表现为高分维值,说明这三个区是深源气通过断穿 T_3 — T_2 或 T_4 — T_2 的断层垂向向上运移的有利地区,这也是形成上述三个深源气藏分布区的主要控制因素。

综上所述, T_2 、 T_3 、 T_4 各反射层上断层高分维值的区域与深源气藏的分布存在着较好的对应关系。这一关系并非是一种随机或偶然的巧合,而有其内在必然性,断层体系分维值大小一定程度上是对深源气二次运移条件有利程度的定量化揭示。

4 结论

(1) 研究区断层体系具有自相似性和分形特征。

(2) 研究区 T_2 、 T_3 、 T_4 三个反射层均表现为断层体系分维相对高值区与深源气藏分布区存在着良好的一致性。

(3) 油气田分布区断层体系分维值高于无油气区分维值, 气田分布区分维值又高于油田分布区。

(4) 断层体系在该区深源气运移和聚集过程中起着重要的控制作用, 断层体系分维值大小是断层体系空间分布复杂程度的度量, 也是反映深源气二

次运移条件的重要指标。

(5) 在早期勘探区可以通过断层体系的分维值相对大小来反映深源气运移条件的好坏, 结合其它地质条件分析可以指明深源气的有利聚集区。

参 考 文 献

- 1 Mandelbort B B. The fractal Geometry of Nature. Freeman San Francisco, 1982. 1~35
- 2 Hewett T A. Fractal Distributions of Reservoir Heterogeneity and Their Influence on Fluid Transport, SPE 15386, 61st Ann. Tech. Conf of SPE, New Orleans, Oct. 5~8, 1986

Fractal Dimensions of Fault Systems and Their Hints to Migration Conditions of Gas from Deep Source Rocks

Xu Jingzhen Liu Xiaodong Chen Zhangming Sheng Yinzhong

(Daqing Petroleum Institute, Heilongjiang Anda 151400)

Abstract

Based upon the theory of fractal geometry, fractal dimensions of fault systems in the area east to the Daqing placanticline, Songliao Basin, were calculated using the box-counting approach to the reflecting T_2 , T_3 and T_4 horizon and the studied area was divided into eight zones with different oil and gas distribution features. From the analysis of fractal behaviours on different sub-systems of faults in the studied area, it was found that the zone with high fault fractal dimensions is in good correspondence with the distribution of gas accumulation from deep source rocks. This suggested that faults are main paths for gas migration from deep source rocks. It was also concluded that the fractal dimension of an fault system is an important parameter to quantitatively characterize the nature of migration and distribution of gas from deep source rocks.

Key Words fractal geometry fractal dimension fault system gas from deep source rock