

四川地区断层与油气田空间分布的关系*

施泽进 罗蛰潭 彭大钧 贺振华

(成都理工学院石油系, 成都 610059)

选择合适的尺度, 可用盒维数方法计算四川盆地油气田空间分布的容量维值; 但运用多重分形理论能更有效地检验断层空间分布的自相似性。四川地区各带多重分维值的结果表明: 油气田和断层的空间分布均为分形结构, 具有很好的自相似性, 相关系数均达到或超过 0.99; 油气田与断层空间分布上有密切关系, 断层空间分布的容量维、信息维及关联维在 1.02, 1.03 及 1.04 左右的区域, 是油气的主要富集区。因此, 四川地区应加强川东南、川中以及绵阳-乐山一带的油气勘探开发, 其它区域的勘探重点应放在深层次的油气藏上。

关键词 分形 分维 空间分布 油气田 四川盆地

第一作者简介 施泽进 男 29 岁 博士后 石油地质

分形几何学^[1]是研究具有自相似形态或事件的一门新兴科学, 由于它能描述极端复杂、极不规则且用传统数学不能刻画的问题, 近些年来已被广泛应用到自然科学的众多领域, 发表了大量研究成果^[2~4]。近代的研究发现, 岩石破裂过程具有随机自相似性, 在很宽的尺度范围内都具有分形特征; 在微观结构上也存在自相似性^[5,6]。油气藏(田)的体积-频度分布满足幂律规律, 为分形分布^[7]。那么, 断层与油气田的空间分布之间有何联系? 本文在用分维描述了断层和油气田的空间分布特征后, 重点探讨两者间的关系。

1 分维的计算方法

将研究区域用不同边长 r 离散化为小正方形, 设 $N(r)$ 为有油气田进入的盒子数, 若 $N(r)$ 与 r 满足如下的幂律关系:

$$N(r) = Cr^{-D} \quad (1)$$

式中 C 为常数; D 为分维。由 (1) 式求得的分维也称容量维, 这种计算分维的方法称为数盒子法。

在断层系统的研究中, 主要是运用容量维的概念^[8~10]; 但容量维的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含的断层条数。鉴于此, 本文应用多重分形概念计算四川地区断层空间分布的分维值, 其中包括容量维 D_0 。多重分形也称多标度分形或复分形, 是定义在分形上多个标度指数的奇异测度组成的无限集合。广义的分维可定义为^[11]:

* 国家博士后科学基金和“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室基金联合资助项目

收稿日期 1994-10-26 改回日期 1995-10-04

$$D_q = \begin{cases} -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{1-q} \frac{\ln \sum P_i^q}{\ln r} & q \neq 1 \\ -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sum P_i \ln (1/P_i)}{\ln r} & q = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中 q 为阶数,可取 $(-\infty, +\infty)$ 区间内的任何实数; P_i 为分形中一个点落入第 i 个尺度为 r 盒子内的概率。令 $I_q(r) = \begin{cases} \ln \sum P_i^q / (1-q) & q \neq 1, \\ \sum P_i \ln (1/P_i) & q = 1 \end{cases}$ 变换 r 值,若 $I_q(r)$ 与 $\ln r$ 之间存在线性关系:

$$I_q(r) = -D_q \ln r + I_0$$

则可由直线的斜率求出对应 q 值的分维 D_q 。本文研究中 q 取为 $[-2, 3]$ 区间内的整数,当 $q=0, 1, 2$ 时, D_q 分别等于容量维 D_0 ,信息维 D_1 及关联维 D_2 。

概率 $P_i(r)$ 可用下式计算,令 n_i 为第 i 个尺度为 r 网格内的断层条数, N 为网格总数,则:

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

从而可用上述方法求取多重分维 D_q 。

2 资料的选择及整理

在用分维对客体特征进行描述时,不同比例尺的图形反映着被测体不同的结构特征。一般比例尺较小的图形,分维往往反映着客体的空间分布特征;比例尺较大的图形,分维常代表其几何形态特征。因此,实际工作中,选择了图1、图2作为底图。

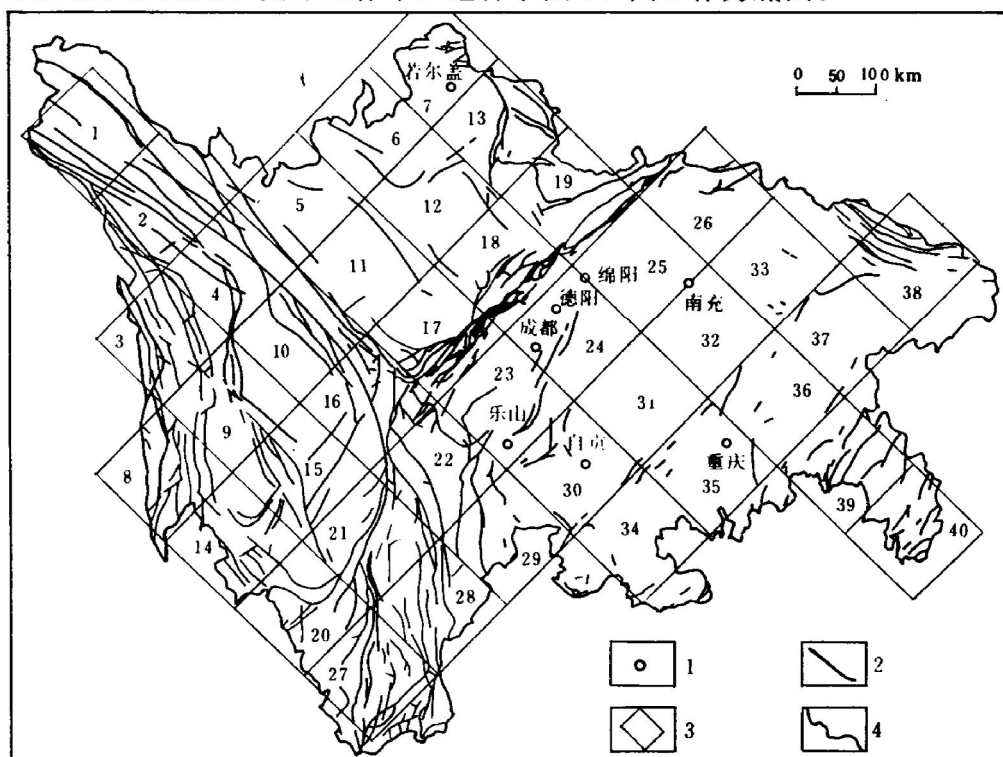


图1 四川地区断层分布图

1—地名标志; 2—断层; 3—网格序号; 4—省界

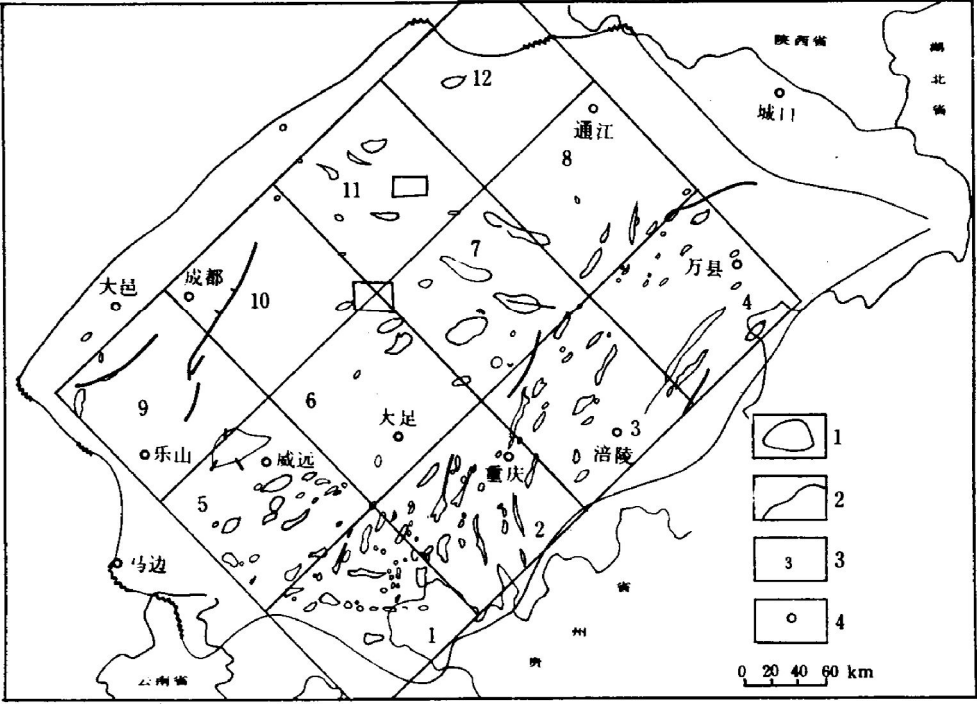


图 2 四川盆地油气田展布图

1—油气田；2—盆地界线；3—盒子序号；4—地名标志

初始网格应以尽量少且覆盖全区为原则。对于断裂研究，选用的初始正方形网格边长为 12 cm (图 1)；对于油气田分布，选择的初始正方形网格边长为 8 cm (约 110.345 km) (图 2)。在此初始网格基础上，再分别划分为不同边长的小正方形，分别统计各网格内的断层数目以及有油气田进入的盒子数目，分别由 (2) 式和 (1) 式求取分维。对于这样的初始网格，当其内部四川省或四川盆地所属区域面积不足初始网格面积一半时，则不参与编号和计算。根据本文选择的图形，分维值是断层及油气田空间分布特征的反映。

3 计算结果

3.1 断层分布的多重分形结构

由图 3 可以看出，在 $r=0.375\sim12\text{ cm}$ 之间，拟合程度很高，相关系数均大于 0.99，表明在此标度范围内断层分布的空间结构具有自相似特征。

为便于对比分析，将图 1 中初始网格所划分的部分分为六个区，1~15 方块为 F-I 区，16~19 方块为 F-II 区，20~22 方块和 27~29 方块为 F-III 区，23~26 方块为 F-IV 区，30~33 方块为 F-V 区，34~40 方块为 F-VI 区。这六个区域按顺序基本对应着四川地区以下的六个构造带：(1) 松潘-甘孜褶皱带，(2) 龙门山褶皱带，(3) 峨眉山、凉山块断带及西昌凹陷，(4) 川西坳陷，(5) 川中块状隆起，(6) 川东南断褶带。用上述方法，可求得每个区对应不同

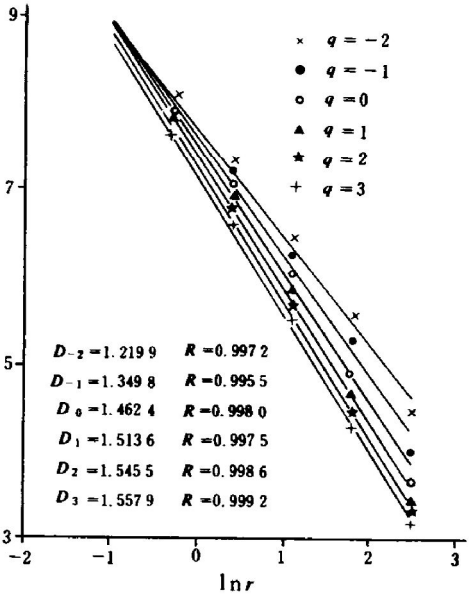


图 3 四川地区断层空间分布的 $I-\ln r$ 关系曲线

q 值的分维 (表 1), 相关系数均达到或超过 0.99。

表 1 F-I 至 F-V 区分维计算结果

区域	D_{-2}	D_{-1}	D_0	D_1	D_2	D_3
F-I	1.311 3	1.404 5	1.480 8	1.523 2	1.538 6	1.537 7
F-II	1.501 7	1.549 8	1.589 9	1.605 6	1.598 8	1.580 7
F-III	1.577 2	1.593 0	1.601 6	1.599 8	1.588 2	1.569 7
F-IV	1.122 3	1.180 4	1.240 5	1.278 3	1.291 0	1.286 9
F-V	0.787 5	0.889 6	1.009 1	1.074 6	1.095 4	1.098 7
F-VI	1.140 9	1.185 8	1.237 4	1.283 0	1.311 4	1.321 5

为了便于与油气田空间分布特征进行对比, 将图 1 中的 34~37 方块作为 F-VI 区, 可求得该区内断层空间分布的容量维、信息维及关联维分别为 1.020 9, 1.031 1 及 1.038 3, 相关系数也均达到 0.99。以上计算结果表明, 在本文所选 12~0.375 cm (合 120~3.75 km) 的标度范围内, 断层分布均具有分维结构。相关系数达到或超过 0.99, 说明断层空间分布的分形特征明显。

当断层被视为直线段时, 其拓扑维 D_T 为 1, 按分维定义应有容量维 $D_0 > D_T$, 在对比例尺较小的图形进行断层空间分布特征研究时, 有可能得到 $D_0 < 1$, 如 Hirata 对日本断层系的研究^[10]。尽管在极端情况下断层可视为空间中的一个点, 但事实上断层总具有一定的长度, 这反映单纯应用容量维来表征断层空间分布特征的局限性。

3.2 油气田空间分布特征

分别用边长为 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25 及 0.1 cm 的网格覆盖图 2, 统计全区各尺度 r 下有油气田进入的盒子数 N , 在双对数坐标中作 $N-r$ 关系图, 由最小二乘法求得分维值 D 为 1.347 6, 相关系数 R 为 0.997 7, 剩余标准差及残差平方和分别是 0.174 3 及 0.121 5, 说明四川盆地油气田的空间分布很好地遵从幂律关系 (图 4)。

将图 2 中 1~4 方块作为 OG-I 区, 5~8 方块为 OG-II 区, 9~12 方块为 OG-III 区, 这三个区域基本对应着四川盆地的三个构造分区: 川东南断褶带、川中块状隆起及川西坳陷。运用同样方法可求得 OG-I、OG-II、OG-III 区油气田空间分布的分维和相关系数 (表 2)。

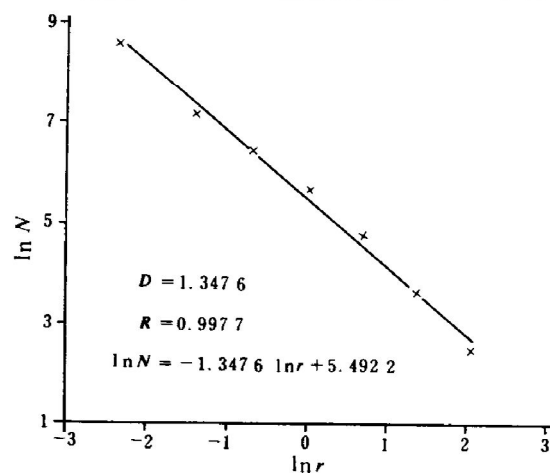


图 4 油气田空间分布的 $N-r$ 关系曲线

表 2 油气田分布分区分维计算值

区域	OG-I	OG-II	OG-III
分维	1.387	1.401	1.181
相关系数	0.995	0.997	0.996

事实上, 分形特征仅在一定的无标度区间范围内成立, 不同的标准区间反映着研究对象不同的结构特征。

4 油气田与断层空间分布关系

对断层空间分布多重分形的研究表明^{*}，多重分维是断层密度、空间分布均匀程度、断层长度以及断层弯曲程度的度量值。断层密度越大、空间分布越均匀、长度越长、弯曲曲率越高，则分维值越大，它是构造复杂程度的测度。由表1可知 $D_i \neq D_j (i \neq j)$ ，表明断层空间分布不属均匀的线性分形，而是复杂分形。对于复杂分形，应采用多种维数来表征^[12]。 D_1 和 D_2 较之 D_0 更能反映断层空间分布的复杂程度和结构特征，所以本区六个构造带断层分布由复杂到简单的排列顺序为 F-I、F-III、F-I、F-IV、F-N、F-V，即龙门山褶皱带断层分布最复杂，川中块状隆起破裂构造分布最简单。

油气田空间分布的分维与油气田分布总面积呈正相关关系，油气田展布面积越大，分维值也越大。同时，分维还反映着一定平面范围内油气田分布的均匀程度，在油气田总面积基本相同的情况下，油气田分布愈均匀，其维数愈高^[13]。

断层分布的 F-N、F-V、F-IVP 区与油气田空间分布的 OG-III、OG-II、OG-I 三个区基本对应（图1，2）。断层与油气田空间分布分维的对比曲线（图5）表明，当断层空间分布的容量维、信息维及关联维分别是 1.009 1，1.074 6，1.095 4 时，油气田空间分布的分维值最大，为 1.401。此后，随着断层空间分布分维值的增大，油气田分布的分维值转而降低，在断层空间分布的容量维、信息维和关联维分别大于 1.240 5，1.278 3，1.291 0 的区域，极少有油气田分布（图2）。这也正是四川地区油气田主要分布于 OG-I、OG-II、OG-III 三个区域中的主要原因。

较强烈的构造运动有利于油气运移，但强烈的构造运动也会造成油气的逸散。因此，适中的构造活动既有利于油气运移，也有利于油气聚集成藏。四川地区破裂构造是油气运移的主要通道，由此可以认为，本区断层空间分布容量维、信息维及关联维分别在 1.009 1 ~ 1.020 9，1.031 1 ~ 1.074 6，1.038 3 ~ 1.095 4 的区域，是油气的主要富集区。对比各带的计算结果（表1），在四川地区应加强川中、川东南的油气勘探开发，并重视绵阳-乐山一带的油气勘探。在 F-I、F-II 及 F-III 区寻找浅层油气藏较为困难，可将重点放在龙门山推覆构造带的下盘。

上述分析表明，断层空间分布的多重分维可以作为判别油气保存条件的依据之一，从而对勘探前景做出正确的评估。

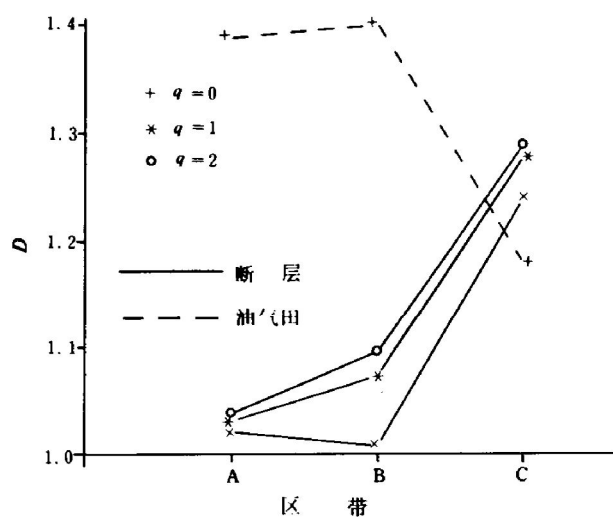


图5 断层与油气田空间分布分维的对比曲线
A—OG-I, F-IVP; B—OG-II, F-V; C—OG-III, F-N

* 施泽进等，四川地区断层空间分布的多重分形特征，待刊。

5 结论

(1) 断层和油气田的空间分布具有很好的统计自相似性, 其相关系数均达到或超过 0.99, 分维是描述这种分布的有效参数。

(2) 四川地区断层空间分布的多标度分维的计算结果显示 $D_i \neq D_j$ ($i \neq j$), 反映断层的空间分布为复杂分形或多重分形, 多标度分维较之容量维更能刻画断层分布的空间结构特征。

(3) 断层空间分布的容量维、信息维及关联维分别大于 1.240 5, 1.278 3, 1.291 0 的区域, 不利于油气的保存。

(4) 断层空间分布的容量维、信息维及关联维分别在 1.009 1~1.020 9, 1.031 1~1.074 6, 1.038 3~1.095 4 的区域, 是油气的主要富集区。

参 考 文 献

- 1 Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature. New York, Freeman, 1983
- 2 Allegre C J, Le Mouel J L, Provost A. Scaling rules in rock fracture and possible implications for earthquake prediction. Nature, 1982, 297: 47~49
- 3 Hatton C C, Main I G, Meredith P G. A comparison of seismic and structural measurements of scaling exponents during tensile subcritical crack growth. J Struct Geol, 1993, 15 (12): 1 485~1 495
- 4 Walsh J J, Watterson J. Populations of faults and fault displacements and their effects on estimates of fault-related regional extension. J Struct Geol, 1992, 14 (6): 701~712
- 5 Hirata T. Omori's power law aftershock sequence of microfracturing in the rock fracture experiment. J Geophys Res, 1987, 92: 6 215~6 221
- 6 赵永红, 黄杰藩, 耿金达等. 岩石破裂带的分维及变化特征. 地质科学, 1994, 29 (2): 137~143
- 7 Scholz C H, Barton C C. The fractal nature of hydrocarbon deposits, 1: Size distribution. AAPG Bulletin, 1991, 75: 668
- 8 Okubo P G, Aki K. Fractal geometry in the San Andres fault system. J Geophys Res, 1987, 92 (B1): 345~355
- 9 Aviles C A, Scholz C H, Boatwright J. Fractal analysis applied to characteristic segments of the San Andres fault. J Geophys Res, 1987, 92 (B1): 331~344
- 10 Hirata T. Fractal dimension of fault systems in Japan: fractal structure in rock fracture geometry at various scales. PAGEOPH, 1989, 131: 157~170
- 11 郝柏林. 分形和分维. 科学杂志, 1985, 38 (1): 9~17
- 12 徐叶邦. 活动断裂带中地震分布时空结构的信息维 D_1 特征初探. 地震学报, 1991, 13 (3): 372~379
- 13 施泽进, 罗蛰潭, 彭大钧等. 四川盆地油气田空间分布的分形特征. 地球科学, 1995, 20 (1): 68~72

RELATIONSHIP OF SPATIAL DISTRIBUTION BETWEEN FAULTS AND OIL-GAS FIELDS IN SICHUAN REGION

Shi Zejin Luo Zhetan Peng Dajun He Zhenhua

(Department of Petroleum, Chengdu Institute of Technology, Chengdu)

Abstract

Selecting pertinent scale, the spatial distribution capacity of oil-gas fields in Sichuan Basin can be calculated by fractal dimensions. Meanwhile, self-similarity of fault spatial distribution can be examined more effectively by using multifractal theory. Calculating results of multifractal dimensions of different zones in Sichuan Region show that spatial distribution of oil-gas fields and faults are fractal structures and have quite well self-similarity with correlation coefficients better than 0.99. Oil-gas fields are closely related to the spatial distribution of faults in these zones. The fractal dimension of capacity, information dimension and correlation dimension of fault spatial distribution are about 1.02, 1.03 and 1.04. These zones are main oil-gas enriched provinces. Therefore, oil-gas exploration and development should be strengthened in southeastern and central Sichuan and Mianyang-Leshan Regions and in other places, hydrocarbon exploration should be focused on deep-seated pools.