

# 断裂和裂缝的分形特征

付晓飞, 苏玉平, 吕延防, 张云峰, 付 广

大庆石油学院地球科学学院, 黑龙江大庆 163318

**摘要:** 在详细剖析断裂和裂缝组成和结构相似性的基础上, 计算了贝尔断陷  $T_5$  和  $T_2$  两层构造图上断裂信息维和 10 口井布达特群岩心裂缝信息维, 分析了影响断裂和裂缝信息维的因素, 达到了从断裂信息维去预测裂缝分布的目的。影响断裂和裂缝信息维的因素包括密度、延伸长度、断层性质以及岩性, 但从根本上讲断层性质及岩性对信息维影响体现在断裂的密度上, 因此信息维应该是断裂发育程度的度量, 利用断裂信息维与裂缝信息维关系、裂缝信息维与裂缝密度关系预测裂缝的分布, 有利的裂缝发育带有 3 个区域, 与现今见油气井分布吻合。

**关键词:** 断裂; 裂缝; 信息维; 影响因素; 有利裂缝发育区。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2007)02-0227-08

收稿日期: 2006-02-10

## Fractal Characteristic and Geological Meaning of Fault and Fracture

FU Xiao fei, SU Yu ping, LU Yan fang, ZHANG Yun feng, FU Guang

Faculty of Earth Science, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China

**Abstract:** Based on the analysis of the forms and the comparability in configuration of fault and fracture, the information dimension of faults on tectonic map  $T_5$ ,  $T_2$  and that of fracture in ten cores from research formation  $J_3b$  were calculated, then the factors affecting their information dimension were analyzed, finally, the distribution of fracture in the research region is predicted. These affecting factors include density, extend, properties of faults and lithology. However, the effects from the properties of faults and lithology are concentrated on density of fault and fracture, so the information dimension is a measurement for to what extent faults have developed. The distribution area of fracture was forecasted two relations; one is the relationship between information dimension of faults, the other is the relationship between the information dimension and density of fracture, three favorable fracture developed areas were sketched, which turned out to be in accordance with the distribution of commercial wells.

**Key words:** fault; fracture; information dimension; affecting factors; favorable fracture developed area.

分形(fractal)的核心是“标度不变性”,即“自相似性”(Mandelbort, 1982; 成秋明, 2004; 王志敬和成秋明, 2006),是以分维数、自相似性、统计自相似性和幂函数等为工具来研究一类无规则、混乱而复杂但部分与整体有相似性的体系(陈春仔和金友渔, 1997)。定量描述这种自相似性的参数称为“分维数”,简称“分维”(fractal dimension),记为  $D$ ,可以是整数,也可以是分数。断裂和裂缝作为含油气盆地中的一种重要的地质现象,其破碎过程具有随机自相似性,断裂和裂缝的分布和几何形态具有明显的

分形结构(金章东等, 1998),因此自20世纪80年代以来地质学家应用容量维数(capacity dimension)、信息维数(information dimension)和关联维数(correlation dimension)去分析断裂系统和裂缝的分形特征,在以下5个方面取得了重要的进展:(1)明确了断裂体系空间分布分维值的大小是断层数量、规模、组合方式及动力学机制的综合体现的一项综合性指标(Berry and Lewis, 1980; Scholz and Aviles, 1985),影响断裂构造分维值的因素有介质的物化性质、构造应力场及区域构造运动强度等(Hira

基金项目: 国家“973”攻关项目“高效大气田形成机理及分布研究”(No. 2001CB20914)。

作者简介: 付晓飞(1973-),男,副教授,主要从事油气藏形成及资源评价方面的工作。E-mail: fuxiaofei2008@sohu.com

ta, 1989; Cowie *et al.*, 1995; 连长云等, 1995; Cello, 1997; 陈江峰和胡诚, 1999; 谢焱石和谭凯旋, 2002); (2) 建立了断裂分形与断裂结构面力学性质的关系(周尽, 1991; 谢和平和 Pariseau, 1994; 孙岩等, 1995, 1997; 易顺民和唐辉明, 1995); (3) 断裂分形结构指示了流体成矿作用(Zhang and Sanderson, 1994; 金章东等, 1998; 卢新卫和马东升, 1999); (4) 断裂分形与油气藏的形成有着密切关系(Barton and Lapointe, 1995; 沈忠民等, 1995; 徐景祯等, 1997; 周新桂等, 1997); (5) 岩石裂缝的分形研究早期主要集中在对裂缝分形分布的验证及分维数的计算等方面, 近期则主要集中探讨岩石变形规律(Hirata *et al.*, 1987; Barton and Hsieh, 1989; 牛志仁和施行觉, 1992; 施行觉等, 1992; 谢卫红等, 1997). 由于断裂和裂缝是同一地质现象的 2 个方面, 其组成应该具有自相似性结构, 因此继上述研究之后, 开始利用断裂的分形理论去预测裂缝的发育规律(吴大奎和甘其刚, 1995; 高如曾等, 1996). 本文也是受这种思想的启发, 在详细计算了海拉尔盆地贝尔断陷不同断裂系统和多口井基岩潜山裂缝的分维数的基础上, 深入剖析影响断裂和裂缝的分维值大小的主控因素, 探讨断裂和裂缝分维值之间的关系以及利用断裂的分维特征去预测有利的裂缝发育带的可能性.

## 1 地质背景

贝尔断陷是海拉尔盆地的二级构造单元(图 1), 自下而上发育侏罗系布达特群(基岩)、兴安岭群、白垩系南屯组、大磨拐河组、伊敏组、青元岗组、古近系呼查山组及第四系地层, 构造演化经历了 6 个阶段: (1) 初始张裂 - 断陷孕育阶段(兴安岭群); (2) 断陷强烈拉张阶段(南一段); (3) 断陷快速沉降阶段(南二组); (4) 断陷稳定拉张阶段(大磨拐河组); (5) 断陷萎缩阶段(伊敏组); (6) 晚白垩纪 - 古近纪拗陷阶段, 其间还经历了 2 次大的抬升: 即青元岗组末、古近纪末期. 由于多期的构造演化使贝尔断陷发育了复杂的断裂系统, 总体上分为 4 种类型的断裂(图 1): 即早期伸展断裂系统( $T_5 \sim T_{22}$ )、晚期张扭断裂系统( $T_{22} \sim T_{04}$ )、早期伸展晚期张扭断裂系统、早期伸展后期张扭晚期逆冲反转断裂系统. 断裂主要形成时期有基岩布达特群沉积后期、南屯组沉积末期和伊敏组沉积末期, 布达特群潜山裂缝

主要为断裂控制形成的构造缝, 早期伸展断裂系统和早期伸展晚期张扭断裂系统对潜山裂缝具有重要的影响, 因此选择  $T_5$  反射层和  $T_2$  反射层的断裂和基岩潜山上 10 口井滚筒扫描的岩心裂缝分维值进行计算, 探索断裂信息维和裂缝信息维之间的关系, 达到利用断裂信息维预测裂缝发育程度的目的.

## 2 断裂和裂缝的自相似性特征

一组物体若表示出“标度不变性”的特征, 则可以认为在任意尺度上, 大、小单元的相对数目保持相等, 数学上则为单元的大小分布服从幂律控制, 此即为分形特征(吴大奎和甘其刚, 1995), 因此断层与裂缝发育特征统计意义上的自相似性特征是研究断裂和裂缝分形的前提和基础.

### 2.1 断层和裂缝展布方向的相似性

贝尔凹陷  $T_5$  反射层断层受南东 - 北西方向的拉张作用, 走向以 NNE 向和 NEE 向 2 个优势方向为主, 按各个构造带统计断裂的走向发现, 除了布勒洪布斯断隆构造带存在 NNW 向优势方向外, 各个构造带断裂展布方向基本以 NNE 向和 NEE 向 2 个优势方向为主, 说明断层在空间分布上存在着统计意义上的自相似性. 通过成像测井解释裂缝的方位发现, 裂缝走向仍以 NNE 向和 NEE 向 2 个优势方向为主, 各个构造带典型井的裂缝方位也是如此, 证实断裂和裂缝之间也存在统计意义上的自相似性(图 2).

### 2.2 断层和裂缝组合形式的相似性

贝尔断陷以  $T_{22}$  为界面发育 2 期断裂, 2 期断裂基本都是在拉张应力场条件下产生的, 由于早期存在的断层与晚期主拉张方向不同, 因此部分断层走滑, 造成断裂的组合模式主要出现 2 种: 即“y”字型 and 反“y”字型及负花状构造, 主干控陷的边界断层如此, 早期和晚期的断层也如此, 不同级次断层断裂组合具有相似特征. 贝尔凹陷布达特潜山裂缝多为断裂的伴生缝, 即断裂和裂缝是同期应力场形成的, 部分裂缝为派生应力场的产物. 共同的应力场特征决定了断裂和裂缝组合形式的相似性, 裂缝以“y”字型和反“y”字型及“x”型为主.

### 2.3 断裂带宽度和裂缝宽度分布规律的相似性

断裂带的宽度与断距呈正比关系, 因此根据断距分布规律和裂缝宽度的分布规律可以分析断裂带宽度和裂缝宽度之间的相似特征. 裂缝的宽度以 0.25 mm 为间距做直方图, 结果表明, 裂缝宽度概率

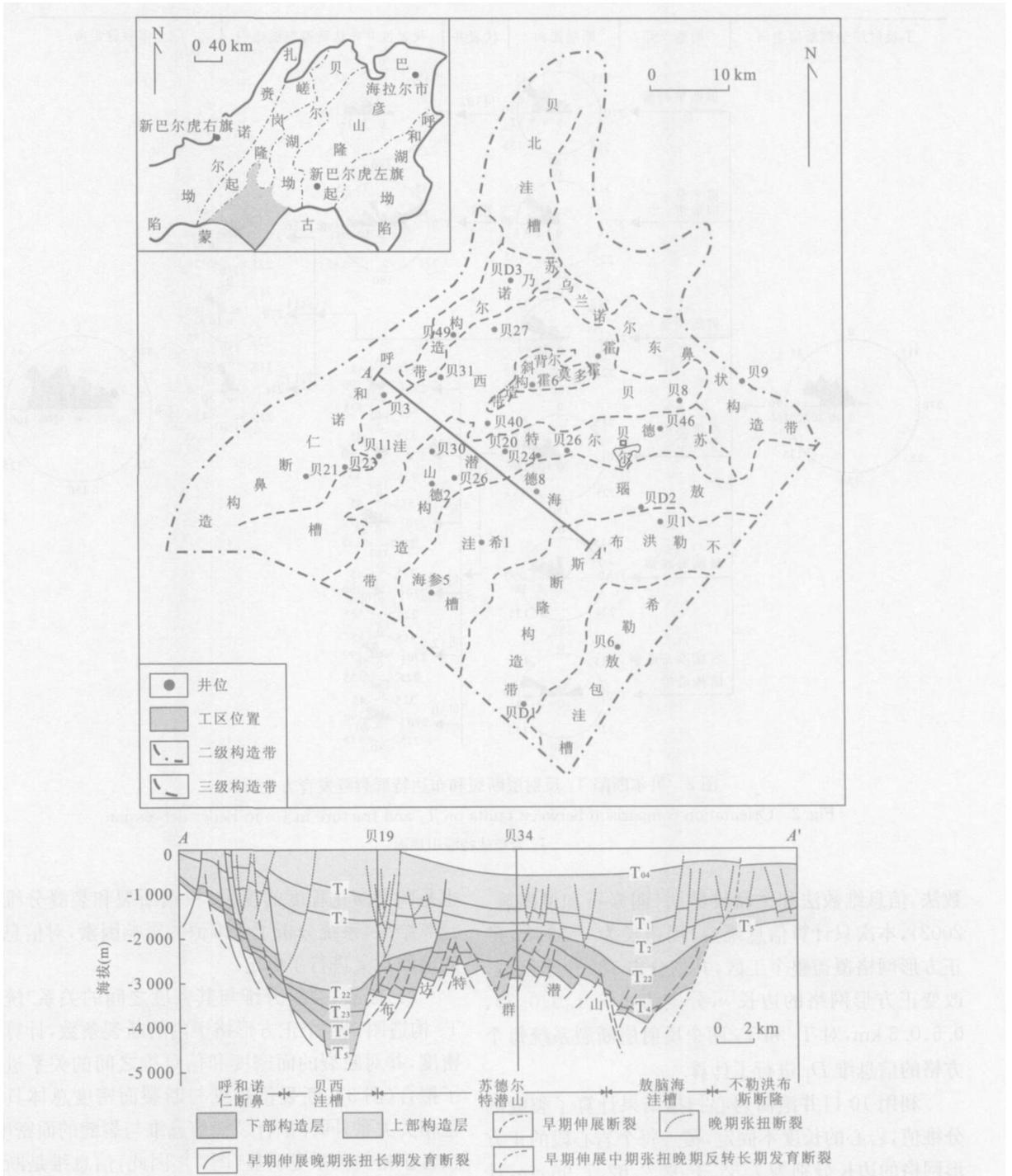


图 1 贝尔凹陷地质概况

Fig. 1 Geological outline of Bei'er depression

峰值位于 0.51~0.75 mm 位置上. 将间距放大 100 倍做断层断距直方图, 断距概率峰值依然位于 51~75 m 位置上, 由于断裂带的宽度和断距具有良好的正相关关系, 因此断裂带宽度和裂缝宽度分布具有相似性.

### 3 断裂和裂缝分维值计算及地质意义

#### 3.1 分维值计算

分形维数的计算方法很多, 最常用的是盒式维

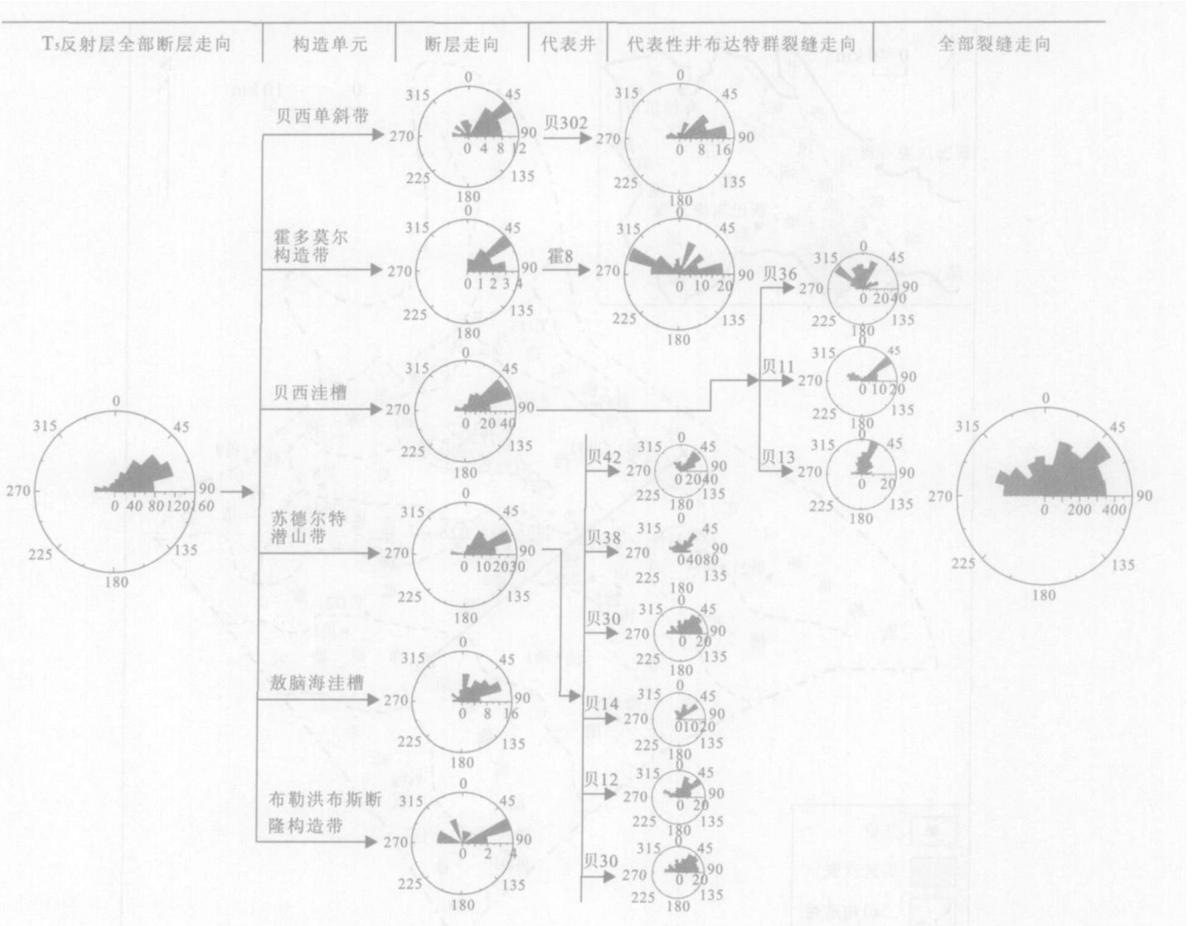


图 2 贝尔断陷 T<sub>5</sub> 反射层断裂和布达特群裂缝发育方位对比

Fig. 2 Orientation comparison between faults on T<sub>5</sub> and fracture in J<sub>3b</sub> in Bei'er depression

T<sub>5</sub> 为布达特潜山顶部

数法、信息维数法和关联维数法(谢焱石和谭凯旋, 2002), 本次只计算信息维数, 用边长为  $r=3\text{ km}$  的正方形网格覆盖整个工区, 共划分出 182 个子区域, 改变正方形网络的边长  $r$ , 分别为 1.5、1.0、0.75、0.6、0.5 km, 对 T<sub>5</sub> 和 T<sub>2</sub> 两个反射层断裂系统每个方格的信息维  $D_1$  进行了计算。

利用 10 口井滚筒岩心扫描结果计算了裂缝的分维值, 岩心的长度不固定, 覆盖每个岩心段的正方形网格的边长分别为 7.85、3.93、2.62、1.96 cm, 计算了岩心上裂缝的信息维。

### 3.2 影响信息维地质因素分析

断裂体系空间分布分维值的大小是断层数量、规模、组合方式及动力学机制的综合体现, 它可以作为断层构造复杂程度的一个定量参数(Berry and Lewis, 1980; Scholz and Aviles, 1985). 研究认为分维值是断裂构造分布的复杂性的定量刻画, 同时

也是断裂演化程度的度量。根据断裂和裂缝分维值计算结果, 系统分析了分维值的影响因素, 对信息维的地质意义进行了标定。

(1) 断裂、裂缝分维与其密度之间的关系. 统计 T<sub>5</sub> 构造图 184 个正方形格子内的断裂条数, 计算面密度, 并对断裂的面密度和信息维之间的关系进行了拟合(图 3), 断裂信息维与断裂面密度总体具有正相关关系, 同样拟合裂缝信息维与裂缝的面密度, 二者正相关关系更明显(图 3). 因此, 信息维是断裂和裂缝密度的定量度量。

(2) 断层分维与断层延伸长度的关系. 从图 3a 中可以看出, 许多点集表现为相同的断裂密度, 分维值却存在很大的差异, 说明断裂的分维受断层复杂程度的影响, 利用断裂面密度为 0.555 56 条/km<sup>2</sup> 的所有格子的断裂总长度与信息维做关系(图 4a), 二者存在正相关关系. 断裂分维反映了断层的连续

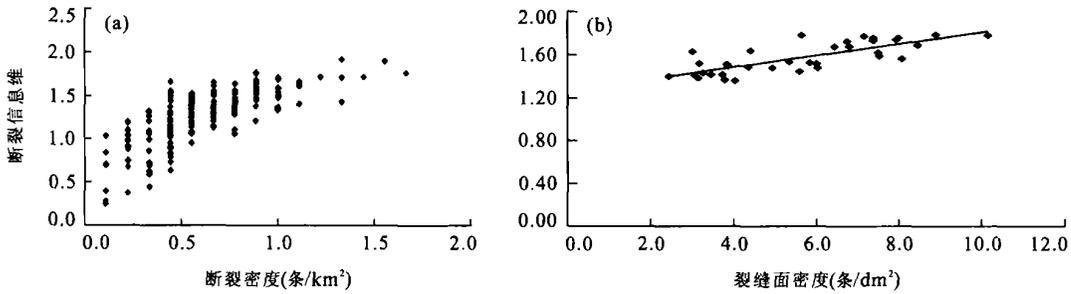


图 3 断裂和裂缝面密度与其信息维关系

Fig. 3 Relation between surface density of fracture and fault and their information dimension

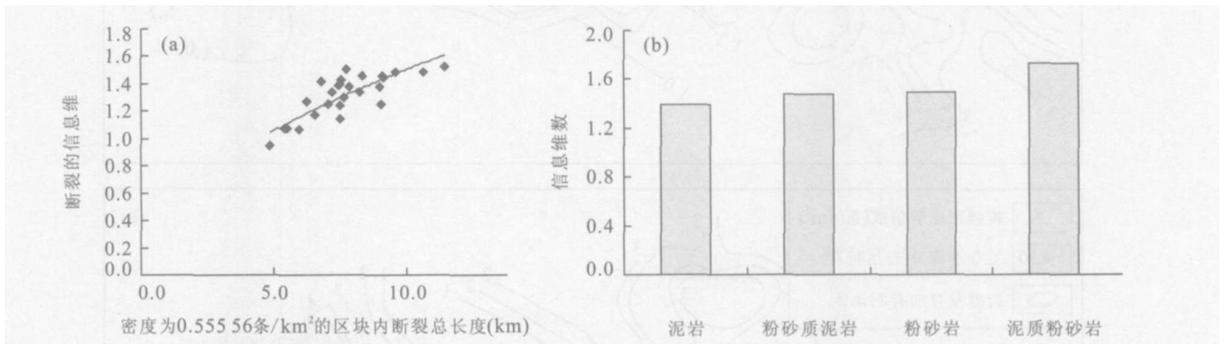


图 4 断裂长度与信息维关系 (a) 和不同岩性裂缝信息维分布 (b)

Fig. 4 Relation between fault length and information dimension (a) and distribution of information dimension of fracture with different lithology (b)

性, 在相同面密度条件下, 分维值越大, 断层延伸长度越大, 连续性越好。

(3) 裂缝分维与岩性关系. 统计 10 口井不同深度段的不同岩性的分维发现, 裂缝分维与岩性关系密切(图 4b), 基本规律是: 泥质粉砂岩 > 粉砂岩 > 粉砂质泥岩 > 泥岩. 从根本上讲, 这种规律是裂缝发育程度决定的, 是岩性不同导致裂缝发育密度不同, 信息维不同, 因此这种关系依然体现信息维是裂缝密度的定量度量。

(4) 断层分维与断层性质之间的关系. T<sub>2</sub> 反射层断裂共有 4 种成因类型: 近 NS 向的张性正断层、NNE 向张扭断裂带、NEE 向张扭断裂带和 NNW 向的张扭伴生的正断层. 从不同类型断层的分布及 T<sub>2</sub> 反射层信息维计算结果来看, NNE 向张扭断裂带分维值最大, 基本为 1.5 ~ 2.3; NEE 向的张扭断裂带分维值次之, 约为 1.2 ~ 1.4; NNW 向的扭动伴生正断层和近 NS 向的张性正断层的分维值为 0.6 ~ 1.2.

尽管断裂、裂缝的密度、延伸长度、断裂的性质、岩性对信息维均有影响, 但断裂性质对分维值的影响体现在断裂的密度上, T<sub>2</sub> 反射层断裂的成因复杂, 主要是因为伊敏组沉积末期应力场性质以近东

西向的拉张作用为主, 近东西向的拉张产生近南北向的张性正断层, 密度较小, 同时使早期 NNE 向和 NEE 向 2 个方向的断层发生走滑, 使 NNE 向断层发生走滑的剪切分量相对较小, 因此按着 Richardel 剪切破裂原理, 产生 3 个方向的断层, 即 NNE、NEE 和近 NS 向, 断层连续性差, 条数多, 且密集成带. 同样的拉张力使 NEE 向断层发生走滑的剪切分量相对较大, 主要表现为“P”剪切, 断层横向贯通、连续性好、条数少和不密集成带. 由于早期构型断裂复活走滑, 将伴生反向的(NNW) 正断层, 多平行展布. NNE 向张扭断裂带断层密度最大, 信息维也最大, 近 NS 向断裂密度较小, 信息维也很小. 因此断裂性质不同, 平面上的面密度不同, 信息维不同, 断层性质通过密度的变化影响信息维大小. 从根本上讲影响断裂和裂缝信息维的因素是密度和延伸长度, 信息维是断裂和裂缝复杂程度的定量表征。

#### 4 断裂、裂缝信息维的关系及应用

断裂和裂缝的形成具有随机自相似性, 其分布

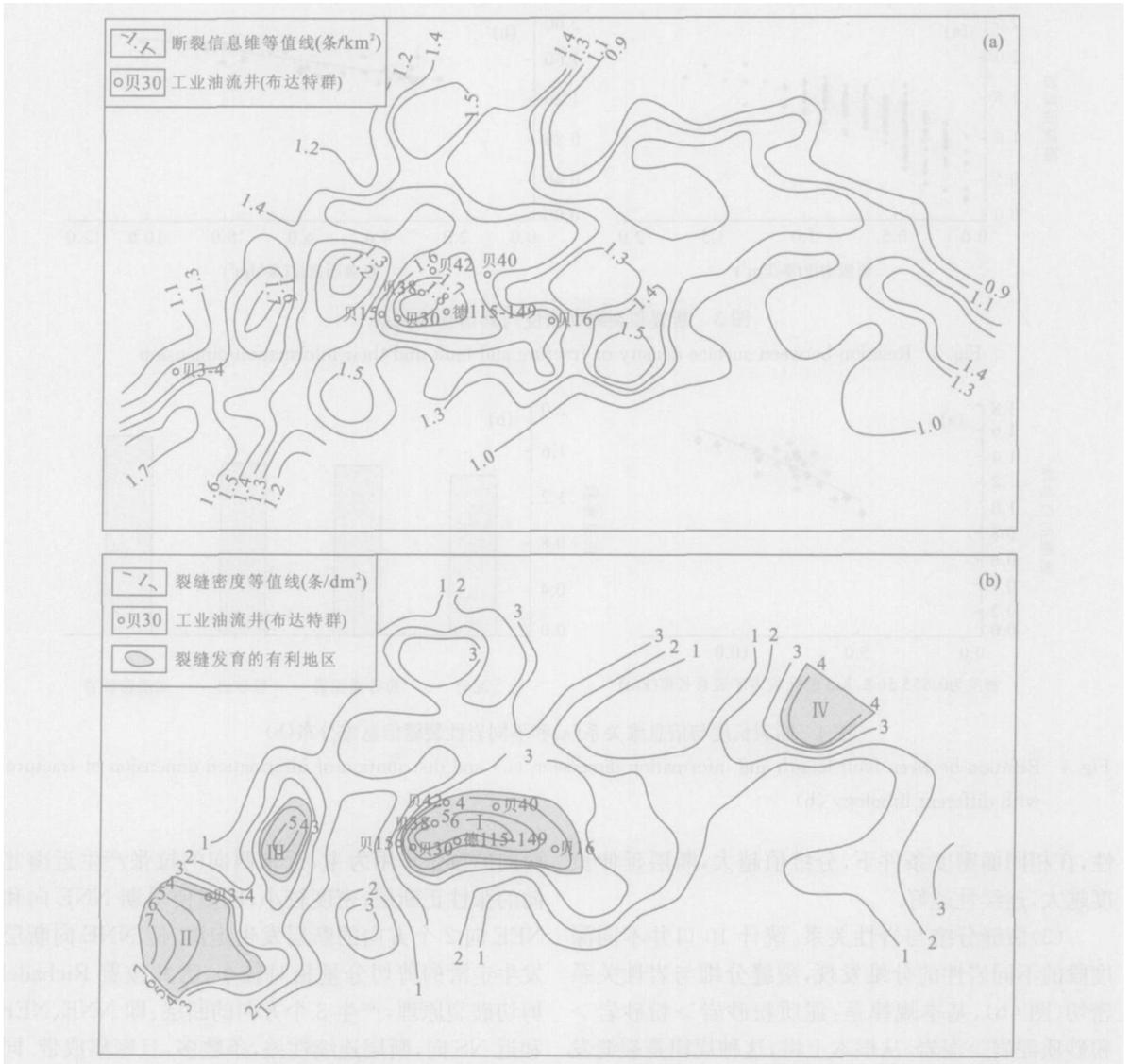


图 5 贝尔断陷布达特群( $T_5$ )断裂信息维(a)及裂缝密度平面分布(b)

Fig. 5 Distribution of faults information dimension (a) and fault density on  $T_5$  in Bei'er depression (b)

a.  $T_5$  反射层断裂信息维平面分布; b. 布达特群裂缝密度平面分布

和几何形态具有明显的分形结构,信息维又是断裂和裂缝密度和延伸长度的定量表征,因此平面上每个子区域断裂信息维和该区域典型井裂缝信息维必然存在定量关系,通过 10 口井裂缝信息维与断裂信息维资料拟合二者之间的关系,进一步根据裂缝信息维与裂缝面密度之间的关系建立断裂信息维与裂缝密度之间的关系,如式 1 所示:

$$M = 10.854D_1 - 13.822. \quad (1)$$

利用这种关系可以根据  $T_5$  反射层断裂信息维预测裂缝的分布(图 5),贝尔断陷  $T_5$  反射层断裂信息维和裂缝密度高值区分布具有一致性,裂缝发育

的有利地区有 4 个,目前在其中 2 个区域(I 和 II)钻井见到工业油气流.利用  $T_5$  反射层断裂信息维预测有利的裂缝发育区只代表裂缝总体发育情况,早期裂缝在后期的成岩作用下多被充填而成为无效缝.有效裂缝受控于后期断裂活动,尤其是伊敏组末期断裂活动产生的从  $T_5$  至  $T_2$ 、 $T_1$  的断裂,根据  $T_2$  反射层断裂的信息维,预测有效裂缝分布的有利地区有 2 个,即图 5b 中的 I 和 II 区.这 2 个区域是油气勘探的有利地区,因为该区早期裂缝发育,晚期断裂活动不仅产生大量新的裂缝,同时使早期缝再度开启成为有效裂缝,极大改善了储层空间.与此同时

断裂活动为潜山油气的充注创造通道条件。

## 5 结论

(1) 贝尔断陷断裂和裂缝在展布方位、剖面组合形态和宽度上具有统计意义的自相似性, 是研究断裂和裂缝的分形特征及从断裂的分维去预测裂缝的基础和前提。(2) 影响断裂和裂缝信息维的因素包括面密度、延伸长度、断裂的性质及岩性, 但断裂的性质和岩性对信息维的影响体现在密度上, 因此信息维的地质意义只代表断裂的发育程度。(3) 利用断裂信息维的平面分布预测有效裂缝发育的有利地区有2个, 其中图5中的I区被钻井证实, II区是下一步油气勘探的有利地区。

## References

- Barton, C. C., Hsieh, P. A., 1989. Physical and hydrological flow properties of fractures. 28th International Geological Congress Field Trip Guide Book T<sub>385</sub>. American Geophysical Union, Washington D. C., 36.
- Barton, C. C., LaPointe, P. R., 1995. Fractals in petroleum geology and earth science processes. Plenum Press New York, 23 - 89.
- Berry, M. V., Lewis, Z. V., 1980. On the Weierstrass Mandelbrot fractal function. *Proc. R. Soc.*, 70: 459 - 484.
- Cello, G., 1997. Fractal analysis of a Quaternary fault array in the central Apennines Italy. *Journal of Structural Geology*, 1(7): 945 - 953.
- Chen, C. Z., Jin, Y. Y., 1997. Application of fractal theory in metallogenic prognosis. *Mineral Resources and Geology*, 11(60): 272 - 276 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. F., Hu, C., 1999. Fractal characteristic of fracture distribution in coal. *Coal Geology & Exploration*, 27(1): 7 - 9 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2004. Quantifying the generalized self similarity of spatial patterns for mineral resource assessment. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(6): 733 - 744 (in Chinese with English abstract).
- Cowie, P. A., Sornette, D., Vanneste, C., 1995. Multifractal scaling properties of a growing fault population. *Geophysics Journal International*, 122: 457 - 469.
- Gao, R. Z., He, G. M., Liu, K. S., et al., 1996. Fractal dimension of fault system and predicted technique of fissures zone in oil gas bearing reservoir. *Acta Geologica Sichuan*, 16(2): 180 - 185 (in Chinese with English abstract).
- Hirata, T., 1989. Fractal dimension of fault systems in Japan: Fractal structure in rock fracture geometry at various scales. *Pure and Appl. Geophys.*, 131: 157 - 170.
- Hirata, T., Satoh, T., Ito, K., 1987. Fractal structure of spatial distribution of microfracture in rock. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 90: 369 - 374.
- Jin, Z. D., Lu, X. W., Zhang, C. L., 1998. A study of fractal dimension of the fracture system in the Dexing porphyry copper corefield Jiangxi. *Geological Review*, 44(1): 57 - 62 (in Chinese with English abstract).
- Lian, C. Y., Su, X. S., Pu, S. C., et al., 1995. Fractal characteristic of deep fault system in China. *World Geology*, 14(3): 35 - 39 (in Chinese with English abstract).
- Lu, X. W., Ma, D. S., 1999. Fractal dimension of fracture systems in antimony metalization zones of Central Hunan and their indicating significance for migration of ore forming fluid and location of ore deposition. *Mineral Deposits* 18(2): 168 - 174 (in Chinese with English abstract).
- Mandelbrot, B. B., 1982. The fractal geometry of nature. W. H. Freeman, New York, 28 - 90.
- Niu, Z. R., Shi, X. J., 1992. Statistics theory of fractal faults of rock. *Chinese Journal of Geophysics*, 35(5): 594 - 603 (in Chinese with English abstract).
- Scholz, C. H., Aviles, C. A., 1985. Fractal dimension of the 1906 San Andreas fault and 1915 Pleasant valley faults. *Earthquakes Notes*, 55: 20.
- Shen, Z. M., Ma, Z. J., Zhou, G. J., 1995. Fractal of faults system and distribution of oil field. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 20(1): 73 - 78 (in Chinese with English abstract).
- Shi, X. J., Niu, Z. R., Xu, H. M., et al., 1992. Fractal measurement and dimension calculation of joints. *Chinese Journal of Geophysics*, 35(2): 154 - 159 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Y., Chen, X. Y., Gou, F. Y., 1995. Fractal dimension  $D$  of fracture surface, new index for appraising structure surface. *Earth Science Frontiers*, 2(1-2): 112 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Y., Wan, L., Zhang, X. H., et al., 1997. Determination of the fractal dimension  $D$  value of the compressive shear and tensile fractures in the northern part of Tarim, Xinjiang. *Geological Review*, 43(2): 162 - 166 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. J., Cheng, Q. M., 2006. Characterization of micro texture of quartz, mylonite deformation process using

- fractal P A model. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(3): 361–365 (in Chinese with English abstract).
- Wu, D. K., Gan, Q. G., 1995. Fracture prediction using fractal interpolation. *OGP*, 30(6): 823–827 (in Chinese with English abstract).
- Xie, H. P., Pariseau, W. G., 1994. Fractal evaluation for rock joints roughness coefficient. *Science in China (Series B)*, 38(5): 524–530 (in Chinese).
- Xie, W. H., Xie, H. P., Li, S. P., et al., 1997. Study on strength and deformation of the fractal joints. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 27(3): 284–288 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. S., Tan, K. X., 2002. Fractal research on fracture structure and application in geology. *Geology Geochemistry*, 30(1): 71–77 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. Z., Liu, M. B., Liu, X. D., 1997. Fractal dimension calculation of faults system and discussion on its relation to the deep source gas migration. *Daqing Petroleum Geology and Development*, 16(3): 14–18 (in Chinese with English abstract).
- Yi, S. M., Tang, H. M., 1995. Fractal structure features of active faults. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 20(1): 58–62 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X., Sanderson, D. J., 1994. Fractal structure and deformation of fractured rock masses. In: Kruhl, S. H., ed., *Fractal sand dynamics systems in geoscience*. Springer Verlag, New York, 37–52.
- Zhou, J., 1991. Research on fractal of Haiyuan fault system. *Northwestern Seismological Journal*, 13(3): 78–85 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. G., Sun, B. S., Liu, J. H., 1997. Fractal characteristic of fault system and its relation to oil gas traps in Kerkang oil field of Liaohe basin. *Journal of Geomechanics*, 3(1): 81–87 (in Chinese with English abstract).
- 成秋明, 2004. 空间模式的广义自相似性分析与矿产资源评价. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(6): 733–744.
- 高如曾, 何光明, 刘开时, 等, 1996. 断层系的分维及储层裂缝发育带的预测技术. *四川地质学报*, 16(2): 180–185.
- 金章东, 卢新卫, 张传林, 1998. 江西德兴斑岩铜矿田断裂分形研究. *地质论评*, 44(1): 57–62.
- 连长云, 苏小四, 朴寿成, 等, 1995. 中国大陆深断裂系的分形特征. *世界地质*, 14(3): 35–39.
- 卢新卫, 马东升, 1999. 湘中锑矿带断裂体系分维及其对成矿流体运移和矿床定位的指示作用. *矿床地质*, 18(2): 168–174.
- 牛志仁, 施行觉, 1992. 岩体分形断裂的统计理论. *地球物理学报*, 35(5): 594–603.
- 沈忠民, 马祖钧, 周光甲, 1995. 断裂体系分维与油田分布. *地球科学——中国地质大学学报*, 20(1): 73–78.
- 施行觉, 牛志仁, 许和明, 等, 1992. 岩石断面的分形测量及其分维的计算. *地球物理学报*, 35(2): 154–159.
- 孙岩, 陈祥云, 勾佛仪, 1995. 破裂面分维 D 值——结构面鉴定的新指标. *地学前缘*, 2(1–2): 112.
- 孙岩, 万玲, 张喜慧, 等, 1997. 新疆塔里木北部地压、扭、张性破裂面分维数 D 值测算. *地质论评*, 43(2): 162–166.
- 王志敬, 成秋明, 2006. P A 分形模型定量度量糜棱岩变形过程中石英微结构的变化. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(3): 361–365.
- 吴大奎, 甘其刚, 1995. 应用分形插值预测裂缝. *石油地球物理勘探*, 30(6): 823–827.
- 谢和平, Pariseau, W. G., 1994. 岩石节理粗糙系数(JRC)的分形估计. *中国科学(B辑)*, 38(5): 524–530.
- 谢卫红, 谢和平, 李世平, 等, 1997. 分形节理的强度和变形研究. *长春地质学院学报*, 27(3): 284–288.
- 谢焱石, 谭凯旋, 2002. 断裂构造的分形研究及其地质应用. *地质地球化学*, 30(1): 71–77.
- 徐景祯, 刘明斌, 刘晓冬, 1997. 断层体系的分形维数及其对深源气运移条件的指示作用. *大庆石油地质与开发*, 16(3): 14–18.
- 易顺民, 唐辉明, 1995. 活动断裂的分形结构特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 20(1): 58–62.
- 周尽, 1991. 海原断层系分形研究. *西北地震学报*, 13(3): 78–85.
- 周新桂, 孙宝珊, 刘金红, 1997. 辽河科尔康油田断裂分形特征与油气关系. *地质力学学报*, 3(1): 81–87.

#### 附中文参考文献

- 陈春仔, 金友渔, 1997. 分形理论在成矿预测中的应用. *矿产与地质*, 11(60): 272–276.
- 陈江峰, 胡诚, 1999. 煤中断裂分布的分形特征. *煤田地质与勘探*, 27(1): 7–9.