

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

拉张盆地伸展量的分形分析

——以渤海盆地为例

刘绍文 王良书 刘波

南京大学地球科学系, 南京大学石油天然气研究中心, 210093

内容提要 研究表明脆性断层的位移分布具有自相似结构, 并且服从幂指数定律, 即具有分形特征。该特征提供了一种计算拉张盆地伸展量的方法(即分数维法)。以此来阐明小断层的滑移对总伸展量的贡献, 从而弥补了由平衡复原法计算伸展量时产生的差值。以渤海盆地为例, 本文详细介绍这种方法的原理及操作, 取得了较好的拟合结果。

关键词 拉张盆地 分数维 水平断距 盆地伸展量 伸展系数

进行盆地定量模拟时, 拉张盆地伸展量是一个重要的地球物理参数, 它刻画了岩石圈动力学与盆地构造特征之间的关系。因此, 如何准确地确定盆地伸展量是一个重要的环节。目前, 主要通过以下途径来计算该参数: ① 盆地热沉降分析(Allen et al., 1992); ② 地壳厚度变化的测量(Allen et al., 1992); ③ 断层的平衡复原计算(Gibbs, 1983; Davison, 1986)。前两种方法计算的结果较接近实际伸展量, 而第三种方法所得结果明显偏小。然而, 第三种方法是通过对地震反射剖面的处理来进行计算, 方法简单因而经常使用。因此, 怎样解释并进一步补偿这种差异是面临的一个问题。以往的解释主要集中在诸如犁式断层的上盘变形(Sclater et al., 1989); 裂隙期间的地壳物质的损失(Ziegler et al., 1989); 上下地壳变形机制的复杂关系(Marsden et al., 1990)或是伸展计算时的误差(White, 1990); 盆内的下盘上升所引起的裂谷肩的侵蚀作用而产生的测量误差(Kusznir et al., 1992)。实际上, 地震波不能分辨的小断层的累计伸展量是更为重要的原因(Marrett et al., 1992; Walsh et al., 1991)。Walsh等(1991)的研究表明, 反射地震资料所不能确定的小断层的累计伸展量是实际盆地伸展量的30%~40%, 因而, 不能忽略这部分伸展量。本文借鉴Marrett (1992)的计算方法, 对渤海盆地的两条地震测线的伸展量进行计算, 取得了较好的结果。

1 理论背景

研究表明: 脆性断层的断距分布与断层数目具有标度不变性和服从幂指数定律, 即具有统计上的分形特征(Kakimi, 1980; Villemin et al., 1987; Childs et al., 1990; Scholz et al., 1990; Walsh et al., 1991; Patton et al., 1992)。该特性可以用以下的数学公式表示:

$$N(d) \propto d^{-C} \quad (1)$$

式中 $N(d)$ 表示断距大于标度断距 d 的断层累积数目, 而 C 是大断层与小断层之间的相关系数, 即断层的分形维数。断层断距的分布具有标度不变性, 断距较大的断层可以用来估算分形维数。据此, 提供了一种估算盆地伸展量的方法。通过对已识别出的相对较大断层进行分形分析, 从而确定出地震剖面上不能识别出的小断层所引起的伸展量。

当研究区的地层倾角很小($<10^\circ$), 通常是 $<5^\circ$ 时, 可以忽略断块旋转对总伸展量的影响, 因而断层的水平断距之和可以较好地代表盆地的伸展量(Marsden et al., 1990; Walsh et al., 1991)。计算盆地的伸展量一般是沿着一定的方向(通常是垂直断裂的走向)进行的。即有下式:

$$\Delta L = h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_N = \sum h_i \quad (2)$$

式中 ΔL 表示沿该方向能被地震反射波所能分辨的断层水平断距之和, h_i 表示断层的水平断距(其中,

注: 本文受“973”课题(编号 G1999330402)、渤海石油公司博士点基金等联合资助。

收稿日期: 2000-06-30; 改回日期: 2000-10-26; 责任编辑: 任希飞、周健。

作者简介: 刘绍文, 男, 1977年生。1999年毕业于南京大学。现为南京大学地球科学系构造地质专业研究生, 从事含油气盆地动力学模拟、深部构造-岩石圈热结构等方面的研究。通讯地址: 210093, 南京市汉口路22号, 南京大学地球科学系99硕。

h_1 表示最大断层的水平断距, h_2 表示第二大断层的水平断距, 依此类推)。考虑到小断层的累计断距是不能测定的, 利用断层位移分布的分形特征, 由下列公式确定小断层的总滑移量 (h_e) (Marrett, 1991):

$$h_e = h_N \left(\frac{C}{1-C} \right) (N+1) \left(\frac{N}{N+1} \right)^{1/C} \quad (3)$$

式中, h_N 是计算剖面中第 N 大断层的水平断距, N 则相应地是该断层的编号值。由于是将断距从大到小排序, N 值越大, 其对应的断距越小。至于如何确定这两个参数, 本文在后面的实例分析中将有说明。相应地, 盆地的伸展量 (d_{total}) 即为相对较大的可分辨断层的累计断距 (ΔL) 与由分形分析而确定的小断层滑移量 (h_e) 之和。即可用以下的数学公式来表示:

$$d_{\text{total}} = \sum h_i + h_e \quad (4)$$

由(3)式可知, 当 $C < 1$ 时, 该式收敛。此时, 盆地伸展量大部分由较大断层的水平断距决定。若 $C > 1$ 时, (3)式发散, 此时小断层的累计断距将大于大断层的累计断距, 从而这些小断层的累计断距将决定盆地伸展量。这时只有知道小断层的规模才能较好地确定盆地的伸展量。

利用分数维法计算盆地伸展量时, 首先要确定研究区内断层位移分布的分数维值 (C)。将断层的水平断距按从大到小的次序编号, 然后以水平断距为横坐标, 相应的序号 (N) 为纵坐标建立对数坐标系。最后用最小二乘法对点进行线性拟合, 该直线的斜率即为相应的断层位移分布的分数维值。

图 1 为一典型拉伸盆地中脆性正断层的位移分布曲线。如图所示, 曲线的上下两部分均偏离线性规律。其中, 下部曲线表示较大断距断层的分布, 体现向右陡倾的趋势。上部曲线表示较小断距断层的分

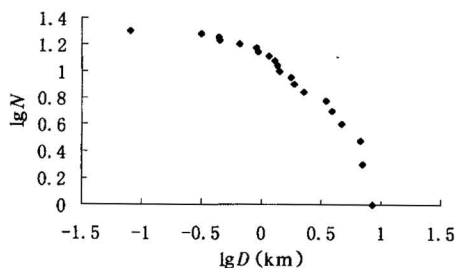


图 1 拉伸盆地中脆性断层群落的位移分布 (一维采样数据) (据 Marrett, 1992)

Fig. 1 Displacement distribution of brittle normal fault population in extensional basins (one-dimensional sampling) (after Marrett, 1992)

布, 略为平缓。曲线中间部分表现为斜率为 $-C$ 的直线。即反映了断层断距分布与断层数的幂指数关系。Pickering 等 (1994) 认为上部曲线偏离线性规律并不影响分数维值, 只要其余数据符合线性特征。但由较大断距断层组成的下部曲线将影响分数维值。

2 实例计算

渤海盆地是我国东部具有丰富油气资源的中新生代沉积盆地。面积约为 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$, 基底为太古宇泰山群深变质岩系, 地壳厚度约为 $29 \sim 32 \text{ km}$ (刘光夏等, 1996)。盆内火山岩分布, 数百米厚。以拉斑玄武岩为主, 为间歇性、多期次水下裂隙式喷发 (金强等, 1998)。岩浆源自壳幔深部, 属于岩石圈上地幔热蠕动沿断层上涌的产物 (张渝昌等, 1997)。经历了多次的断陷—拗陷阶段 (李德生, 1986)。盆地总体上呈菱形, 其东端在辽东湾沿 NNE 向逐渐变窄, 而在西南端沿东濮凹陷向 SSW 向变成狭长带状拗陷。渤海盆地在郯庐断裂和兰聊断裂这两条大型右行走滑断裂的夹持下, 表现为右行走滑拉分盆地^①。中新生代渤海盆地在伸展和走滑两种活动机制下, 发育了一系列地堑和半地堑 (戴俊生等, 1999)。渤海盆地的发展是受基底断裂活动控制, 是中新生代的拉张断陷盆地, 是在区域拉张应力作用下形成的张性断裂群体。NE—NNE 向断层控制断陷沉积, 同时发育 NW 向配套断裂。形成东西分带, 南北分块的多凸多凹、多层结构的构造格局, 具有陆相断陷盆地的油气聚集规律 (张渝昌等, 1997)。

本文选取一条横穿渤东的测线 TX92044 和渤南的一条测线 VBPZ1085 进行伸展量计算 (图 2)。计算方法如上所述。所拟合的斜率 (即分数维值) 为 -0.70 (图 3)。均符合断层位移分布的分数维特征, 把与拟合直线相交的最后一个断层设置为该断层群落中的第 N 条断层, 其水平断距为 h_N 。对于一维采样数据的分数维值, 以往的文献报道不尽相同, 一般为 $0.70 \sim 0.90$ (Walsh et al., 1991); 亦有报道为 $0.71 \sim 0.83$ (Marrett et al., 1992); 甚至还有是 $0.37 \sim 1.70$ (Kakimi, 1980; Villemin et al., 1987; Childs et al., 1990; Scholz et al., 1990; Patton et al., 1992)。之所以有如上的诸多结果, 是因为采用不同的采样数据的方法所致。本文的结果与上述范围基本吻合。

① 卢华复, 胡圣标, 王良书等. 1999. 渤海盆地热历史、构造-演化与断裂活动及油气成藏关系研究. “九五”科技攻关项目。

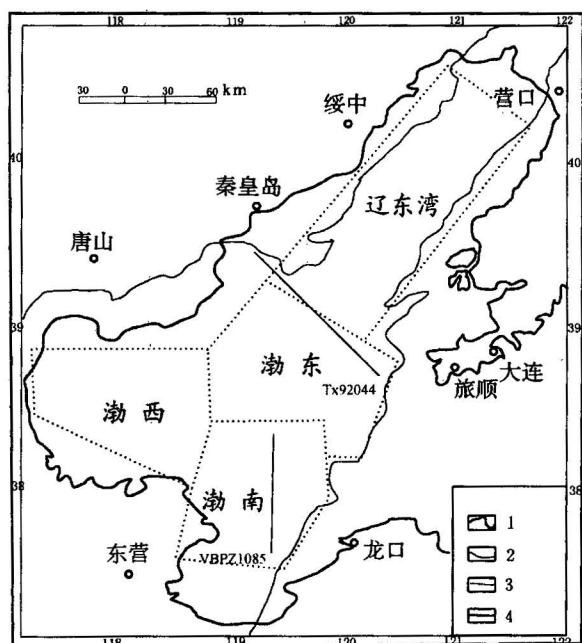


图2 渤海盆地测线位置图

(据渤海石油公司, 1991 修改)

Fig. 2 Plot of seismic lines TX92044 and VBPZ1085 in the Bohai basin (modified from Oil Corporation of Bohai, 1991)

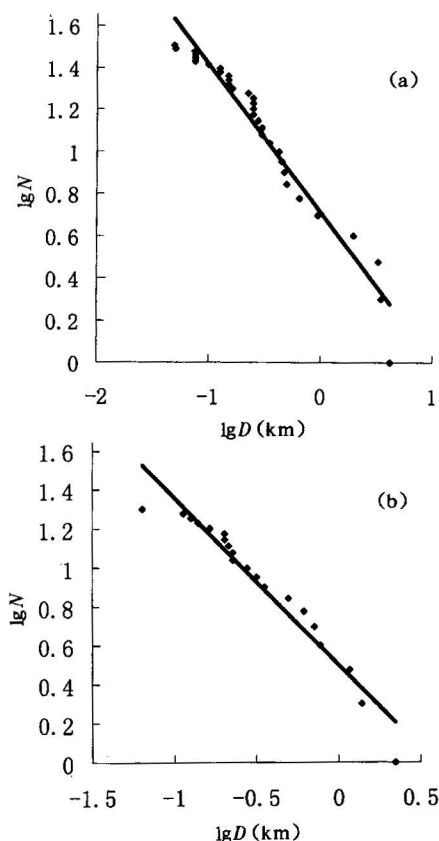
1—海岸线; 2—盆地边界; 3—构造分区; 4—地震测线
1—Coastal line; 2—basin boundary; 3—tectonic subarea; 4—seismic line

对渤海盆地内部分凹陷的新生代水平伸展量进行了研究, 不同区域的伸展量相差极为明显。盆地伸展构造的水平伸展量是反映盆地构造特征(包括盆地几何结构和构造深度)的重要参数。为了进行对比研究, 本文以伸展系数为指标进行分析。伸展系数(β)定义为伸展后长度与伸展前长度的比值。为了论证小断层的伸展量对整个盆地伸展量的贡献, 在这里还利用断层的平衡复原法的计算结果进行对比。对渤海盆地两条测线的伸展量计算如表1所示, 可见不同区域的伸展系数略有差异。前人在该区亦有研究, 如辽东湾-辽河盆地的测量结果表明新生代地壳伸展系数在 1.11~1.35 范围内(漆家福等, 1995)。田在艺等(1990)、徐杰等(1985)、刘池洋(1990)也曾对渤海盆地不同区域进行研究, 计算结果表明伸展系数大致在 1.15~1.40 之间。不同的研究者所用的方法及假定条件均不同, 但结果都表明地壳伸展量在时空的分布是不均匀的。在空间上, 绝大多数分布在主边界上。在时间上, 主要的伸展作用发生于始新世至渐新世期间。这种伸展量分布的时

空差异表明渤海盆地幕式伸展的特点, 即整个盆地的形成不是一次拉伸而成的, 而是经历多次的断陷—拗陷阶段^①。

3 结语及讨论

通过以上的计算与分析可知, 利用分数维法能

图3 测线 TX92044 (a)和测线 VBPZ1085 (b)上断层的水平断距(D)与累积断层个数(N)的对数图Fig. 3 Lg-lg plot of cumulative number (N) against heave (D) from seismic lines TX92044 (a) and VBPZ1085 (b)

够计算盆地伸展量。并且, 小断层的累计断距对整个盆地的伸展量的贡献不能忽略, 在本文所研究的两条测线上, 它们分别占到总伸展量的 18% 和 38%。Marrett (1992) 和 Patton 等 (1992) 曾分别对 Viking 地堑和苏伊士湾进行计算, 发现这部分伸展量占总伸展量的 20%~60%。当然, 这种方法亦可用于计算逆掩冲断地区的地壳缩短量。

① 卢华复, 胡圣标, 王良书等. 1999. 渤海盆地热历史、构造-演化与断裂活动及油气成藏关系研究. “九五”科技攻关项目。

表 1 用分数维法计算盆地伸展量

Table 1 Extensional amount of the Bohai basin by fractal method

测线	测线现长度 (km)	h_N (km)	Σh_i (km)	h_e (km)	总伸展量 (km)	平衡复原法计算 总伸展量(km)	β 值
TX92044	144	0.074	27.278	5.910	33.188	26.550	1.29
VBPZ1085	94.8	0.140	10.218	5.419	15.637	11.728	1.19

本文是利用一维采样数据进行分析的,若在一个横剖面或平面图上测量变形时的应变,即用二维采样数据计算,可得更合适的分数维值 C ,一般二维采样数据的分数维值的范围是 1.3~1.5 (Marrett, 1992)。此外,亦有人利用断层几何矩张量对断层变形进行三维采样数据分析,当然,其分析更加完善 (Scholz et al., 1990; Walsh et al., 1991; Marrett et al., 1990; Marrett, 1991)。然而,利用一维采样数据进行分析是合宜且可行的 (Walsh et al., 1991)。此外,对于小断层的贡献的大小,以往多基于断层的数量分析,然而,从本例可看出是分数维值 (C) 的大小决定着小断层的重要性。 C 值越大,其重要性也越大,反之亦然。

在完成本文的过程中,曾与王国强、王勤两位博士进行过有益的讨论与交流,在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 戴俊生,李理,陆克政,漆家福. 1999. 渤海湾盆地构造对含有油气系统的控制. 地质论评, 45(2): 202~208.
- 金强,熊寿生,卢培德. 1998. 中国断陷盆地主要生油岩中的火山活动及其意义. 地质论评, 44(2): 136~142.
- 李德生. 1986. 渤海湾盆地复式油气聚集(区)带地开发前景. 石油学报, 7(1): 1~21.
- 刘池洋. 1988. 拉伸构造古构造恢复和平衡剖面的建立——以渤海为例. 石油实验地质, 10(1): 33~43.
- 刘光夏,任文菊. 1996. 渤海地壳厚度研究. 物探与化探, 20(4): 338~341.
- 漆家福,张一伟,陆克政,杨桥. 1995. 渤海湾新生代裂陷盆地的伸展构造模式及其构造动力学过程. 石油实验地质, 17(4): 316~323.
- 田在艺,韩屏. 1990. 渤海断陷盆地拉张量分析与油气潜力. 石油学报, 11(2): 1~12.
- 徐杰等. 1985. 华北平原新生代裂谷盆地的演化及运动特征. 现代地壳运动(1). 北京:地震出版社.
- 张渝昌等. 1997. 中国含油气盆地原型分析. 南京:南京大学出版社, 351~352.

References

- Allen P A, Allen J R. 1992. Basin Analysis; Principles & Application. Oxford London: Blackwell Scientific Publications, 90~92.
- Childs C, Walsh J, Watterson J. 1990. A method for estimation of the density of fault displacements below the limits of seismic resolution in reservoir formations. In: Buller A T, et al., ed. North

Sea oil and gas reservoirs II. London: Graham & Trotman, 309~318.

- Dai Junsheng, Li Li, Lu Kezheng, Qi Jiafu. 1999. The control of tectonism on the petroleum systems in the Bohai Bay basin. Geological Review, 45(2): 202~208 (in Chinese with English abstract).
- Davison A. 1986. Listric normal fault profiles: calculations using Bed-length Balance and fault displacement. Journal of Structural Geology, 8(2): 209~210.
- Gibbs A D. 1983. Balanced cross-section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics. Journal of Structural Geology, 5(2): 153~160.
- Jin Qiang, Xiong Shousheng, Lu Peide. 1998. Volcanic activity in major source rocks in faulted basin of China and its significance. Geological Review, 44(2): 136~142 (in Chinese with English abstract).
- Kakimi T. 1980. Magnitude-frequency relation for displacement of minor faults and its significance in crustal deformation. Geological Survey of Japan Bulletin, 31: 467~487.
- Kusznir N J, Ziegler P A. 1992. The mechanics of continental extension and sedimentary basin formation: a simple-shear/pure-shear flexural cantilever model. Tectonophysics, 215: 117~131.
- Li Desheng. 1986. Prospect of the composite megastructural oil and gas field in Bohai Gulf of China. Acta Petrolei Sinica, 7(1): 1~21 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chiyang. 1988. The reproduction of paleo-structure and the establish of equilibrium profile for extension structure area—An example of Bohai gulf basin. Experimental Petroleum Geology, 10(1): 33~43 (in Chinese with English abstract).
- Liu Guangxia, Ren Wenju. 1996. Study on crust thickness of Bohai, China. Geophysical and Geochemical Exploration, 20(4): 338~341 (in Chinese with English abstract).
- Marrett R, Allmendinger R W. 1990. Kinematic analysis of fault-slip data. Journal of Structural Geology, 12: 973~986.
- Marrett R. 1991. Estimates of strain due to brittle faulting: Sampling of fault population. Journal of Structural Geology, 13: 735~738.
- Marrett R. 1992. Amount of extension on "small" faults: An example from the Viking graben. Geology, 20: 47~50.
- Marsden G, Yielding G, Roberts A M, Kusznir N J. 1990. Application of a flexural cantilever simple-shear/pure-shear model of continental lithosphere extension to the formation of the northern North Sea basin. In: Blundell D J, Gibbs A D, ed. Tectonic evolution of the North Sea rifts. Oxford. England: Oxford University Press, 240~261.

- Patton T L, Moustafa A R, Nelson R A, Abdine A S. 1992. Tectonic evolution and structural setting of Suez rift. In: London S M, et al., ed. Interior Rift Basins. A. A. P. G. Special Publication, 9~55.

- Pickering G, Bull J M, Sanderson D J, Harrison P V. 1994. Fractal fault displacements: A case from the Moray Firth, Scotland. In: Kruhl J H, ed. Fractals and Dynamic systems in Geoscience.

- Berlin: Springer-Verlag, 105~119.
- Qi jiafu, Zhang yiwei, Lu kezhen, Yang qiao. 1995. Extensional structure model and dynamics processes of Bohai bay faulted basin in Cenozoic. *Experimental Petroleum geology*, 17(4): 316~323 (in Chinese with English abstract).
- Scholz C H, Cowie P A. 1990. Determination of total strain from faulting. *Nature*, 302:837~839.
- Slater J G, Shorey M D. 1989. Mid-Jurassic through mid-Cretaceous extension in the Central graben of the North Sea —part 2: Estimates from faulting observed seismic reflection line. *Basin Research*, 1:201~215.
- Tian Zaiyi, Han Ping. 1990. Extension analysis on the Bohai faulted basin and its hydrocarbon potentiality. *Acta Petrolei Sinica*, 11(2):1~12 (in Chinese with English abstract).
- Villemin T, Sunwoo C. 1987. Distribution logarithmique self-similar des rejets et logueurs de failles; Exemple du Bassin Houiller lorrain. Paris, Académie des Sciences Comptes Ser. I. 305: 1309~1312.
- Walsh J, Watterson J, Yielding G. 1991. The importance of small-scale faulting in regional extension. *Nature*, 351:391~393.
- White N. 1990. Does the uniform stretching model work in the North Sea? In: Blundell D J, Gibbs A D, ed. *Tectonic evolution of the North Sea rifts*. Oxford England: Oxford University Press: 217~239.
- Xu Jie, et al. 1985. Evolution and moving features of North China plain rift basins in Cenozoic. *Modern Crust Moving* (1). Beijing: Seismic Press (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuchang, et al. 1997. Prototype analysis of petroliferous basins in China. Nanjing: Nanjing University Press, 351~352 (in Chinese with English abstract).
- Ziegler P A, Van Hoorn B. 1989. Evolution of North Sea rift system. In: Tankard A J, Balk Will H R, ed. *Extensional tectonics and stratigraphy of North Atlantic margins*. A. A. P. G. memoir, 46: 471~500.

Fractal Analysis of Extensional Quantity of the Extensional Basin

—Taking the Bohai Basin as an Example

LIU Shaowen, WANG Liangshu, LIU Bo

Oil and Gas Research Centre of Nanjing University, Nanjing, 210093

Abstract

Study shows that the displacement distribution of brittle fault population exhibits self-similarity and has the power-law relationship between displacement and accumulation. In other words, brittle fault population follows the fractal size distribution. The extensional quantity of a basin can be estimated based on this result (fractal method), which demonstrates the contribution of cumulative extension of a small fault to the whole one, and accounts for the discrepancy between the plain spastic restoration and the other methods. Taking the Bohai basin as an example, the principle and procedures of this method are introduced in detail and good fits have been obtained in the study area.

Key words: extensional basin; fractal dimension; heave; extensional quantity; extensional factor