

海原断层系的分形研究

周 尽

(云南省地震局)

摘 要

本文根据Okubo等人测量圣安德烈斯断层系所用的复盖维数法,对海原断层系进行了分形测量,求出海原断层系的整体维数 $D_0 = 1.137$,其景泰段 $D_0 = 1.109$,海原段 $D_0 = 1.182$ 。计算中未得到邵家水段和李俊堡段的分维数。此外,文中还着重探讨了断层几何与地震活动性及其力学环境的关系,进一步证明了自相似断层的几何复杂性与地震活动密切相关,剪切断裂带具较低分维数(1.1—1.3),而在张性环境中形成的断裂体系具较高的分维数(1.5—1.6)。最后本文讨论了断层迹线图等因素对分形测量精度的影响。

关键词: 海原断层系 地震活动性 分形 分维 自相似 自仿射

一、引 言

近年来,分形理论(Fractal Theory)、混沌论(Chaos)和“新三论”——协同论(Synergetics)、突变论(Catastrophe)和耗散结构理论(Dissipative Structures Theory)迅速发展并在各门学科中得到广泛应用,目前已有许多地学工作者把它们应用到了地学领域^[1],其中研究活断层的分形特性便是一例^[2、8]。本文主要应用B.B.Mandelbrot所发展的分形几何学^[4、5]来研究海原断层系的几何复杂性,并进一步探讨海原断层几何结构与地震活动的关系。

二、断层几何的分形和分维

1. 分形与分维

众所周知,维数是几何对象的一个重要特征量。人们习惯于用整数维数来描述普通的几何对象。分维就是整数维数概念的推广,简单地说,分维就是其维数不必为一整数而可以是分数,分形是具有分维特性的几何对象。严格说来,分形是指一类极其破碎而复杂,但有其自相似性或自仿射性的体系。用数学语言来表达,分形是指在均匀线性变换群或非均匀线性变换群或非线性变换群作用下具有结构不变性的体系。分维是定量描述分形的重要参数。我们分别把均匀线性变换群和非均匀线性变换群的分形称为自相似分形(即线性分形)和自仿射分形^[6],而把自仿射分形和非线性变换群的分形统称为非线性分形。由于自然界的许多

事物均具有自相似的层次结构, 因此, 本文应用自相似分形理论来研究海原断层系的几何结构。自相似分形在地学领域中已得到广泛应用(2、8、7)1)。本文采用 Okubo 等的复盖维数法(2)来测算海原断层系的分维。

2. 资料和方法

(1) 海原断层迹线图的选取

海原断层主要由 7 条长度不等、倾向不同、性质各异的不连续雁列断层组成。西起景泰县兴泉堡 2 公里处, 终止于固原哨口, 全长约 215 公里, 是一条引人注目的以左旋走滑为主的活动断层(见图 1)2)。

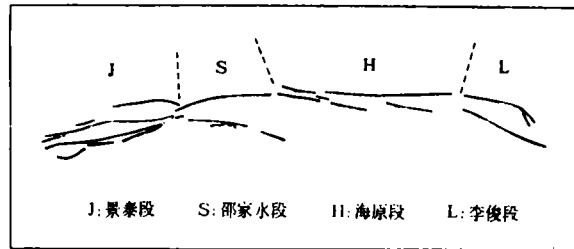


图 1 海原断层系迹线图

Fig. 1 Fault trace map for Haiyuan Quaternary active fault system

我们采用文献 2) 编制的 1:200000 海原活动断裂带地质图, 并根据最新的卫片解释资料校正并增补了所选定的整个断裂带的断层迹线图, 从而得到了一张可用来测定其分维的底图(图 1)。根据整个断裂带的断层几何分布的直观性和地震活动性, 我们将海原断裂带包括主断层及其两侧 30 公里范围内所有第四纪以来活动的断层分为如图 1 所示的 J、S、H、L 4 段。其中 J 表示景泰段, 西起兴泉堡, 东止荒凉滩; S 代表邵家水段, 西起邵家水, 东止黄家洼山; H 为海原段, 西起黄家洼山, 东止油房园西; L 为李俊堡段, 西起小南川, 东止沙沟以西 15 公里处。整个断裂带记为 T。

(2) 测定断层系分维的方法

目前, 测算断层系的分维主要有两种方法, 即数盒子法 (Box-counting Method) 和复盖维数法 (Covering Dimension Method)。为了便于对比和分析, 我们采用后者来确定海原断层系的分维。

众所周知, 测定分形的分维数首先要确定特征尺度和“无标度区”, 复盖维数法亦如此。首先要根据分形即断层迹线图的分布情况选择合适的尺度 r , 以 r 为半径画圆来复盖断层迹线, 要求所用的这种圆的数目 $N(r)$ 应为最少。这样断层长度 $L(r)$ 可定义为 N 个圆的总面积除以单个圆的直径(2), 即

$$L(r) = N(r) \pi r^2 / 2r. \quad (3)$$

用因子 $\pi/4$ 对 $L(r)$ 归一化, 得:

$$L^0(r) = 2N(r)r. \quad (4)$$

$L^0(r)$ 可称为断层的似长度。

1) 马瑾等, 鲜水河断裂带断层几何与地震活动性, 1988.

2) 刘百篪等, 1920 年海原地震破裂带研究, 1988.

对于在“无标度区”内选定的不同 r 值,可由(4)式算出其相应的似长度 $L^0(r)$ 。在双对数图上画出 $\log L^0(r) - \log r$ 图,即可得一条直线,根据其斜率 b 的大小就可求出表征这一断层几何复杂性的分维数 D ;

$$D = 1 - b$$

对断层迹线,显然有 $1 < D < 2$; D 越大,其几何特性就越复杂。

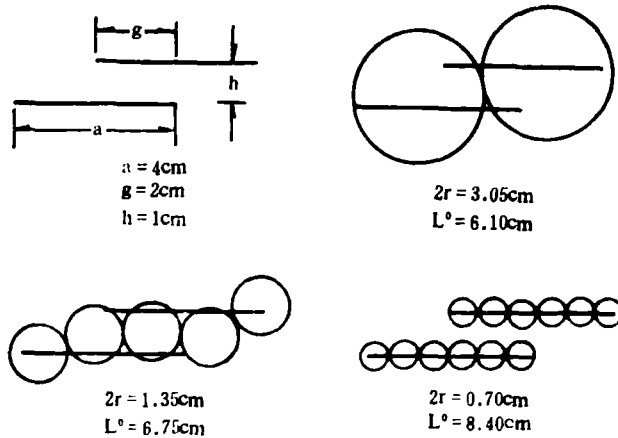


图2 用三条不等的“基准”长度来测定两条雁列线段系统的长度〔2〕

Fig. 2 Measurement of the length of a system of two echelon line segments using three different “yardstick” lengths

为了应用上述方法测定海原断层系的分维,我们给出一个测定两条平行错动雁列断层长度的简单例子,如图2所示〔2〕。可以看出,随着 r 的减小,断层长度 $L^0(r)$ 增加,但当 $2r < h$ 时,随着 r 的减小,所测得的断层长度将趋于一稳定值: $L^0(r) = 8\text{cm}$ 。若取不均匀的间距和断层长度,则 $L^0(r)$ 将在更宽的尺度内变化,但其变化的细节将取决于各断层段

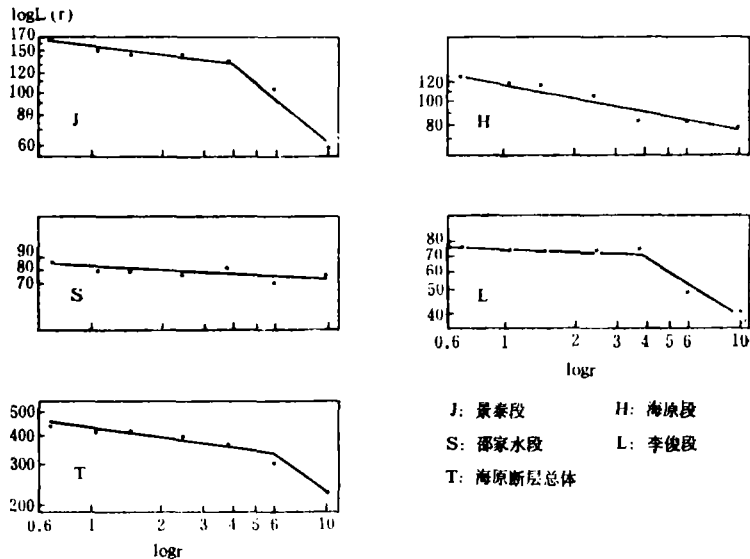


图3 海原断层系断层长度 $L^0(r)$ 与其测量半径 r 的关系

Fig. 3 Fault length $L^0(r)$ versus measuring radius data for Haiyuan active fault system

的总范围和段长 a 和 h 的分布, 即断层几何复杂性。

3. 海原断层系的分形测量

根据上述资料和方法, 我们选取了合适的尺度范围即 $r = 0.68—10\text{km}$, 算出了海原断裂带整体及各分段的似长度 $L^0(r)$, 用线性最小二乘拟合, 结果见图3、表1。

表1 海原断层系整体及其各分段的断层长度和分维数

分 段	整体断层系	景 泰 段	邵家水段	海 原 段	李俊堡段	
$r = 10\text{km}$						
N	12	8	4	4	3	
$L^0(r)$, km	240	60	80	80	40	
$r = 6.0\text{km}$						
N	26	9	6	7	4	
$L^0(r)$, km	312	108	72	84	48	
$r = 3.8\text{km}$						
N	49	18	11	11	10	
$L^0(r)$, km	372.4	136.8	83.6	83.6	76	
$r = 2.44\text{km}$						
N	81	30	16	21	15	
$L^0(r)$, km	395.28	146.4	78.08	102.48	73.2	
$r = 1.47\text{km}$						
N	141	51	28	39	25	
$L^0(r)$, km	414.54	149.94	82.32	114.66	73.5	
$r = 1.05\text{km}$						
N	198	72	38	56	35	
$L^0(r)$, km	415.8	151.2	79.8	116.48	73.5	
$r = 0.68\text{km}$						
N	322	126	63	91	56	
$L^0(r)$, km	437.92	170.0	85.68	123.76	76.16	
相关系数 γ	-0.926	-0.937	-0.536	-0.965	-0.824	
方差	σ_y	0.048	0.031	0.023	0.073	-0.007
	σ_x	0.324	0.264	0.358	0.388	0.203
分维数 D_0	1.137	1.109	无	1.182	无	
尺度范围 r (km)	0.68—6.0	0.68—3.8	0.68—10			

从图3及表1中不难看出, 对于 $r = 0.68—6\text{km}$, 整个断层系的似长度 $L_0(r)$ 的对数和半径 r 的对数这两组数据拟合得很好, 由斜率 $b = -0.137$ 得出海原断层系的整体维数 $D_0 = 1.137$ 。说明了整个断层系具有自相似的层次性。这也从另一个侧面反映了海原断裂带新构造运动较强烈这一特点。

对该断层系的分段计算结果表明, 4段中只有海原段拟合得最好, 其“无标度区”最宽, 至少在 $0.68—10\text{km}$ 范围内, 分维数较高, 表现出较强的自相似性; 景泰段次之, 其“无标度区”最窄, 在 $0.68—3.8\text{km}$ 以内, 表明该段的断层几何结构相对简单, 邵家水和李俊

堡两段数据在0.68—10km标度范围内拟合得很差，以致于求不出分维数，可以说它们可能不具自相似的层次结构，因而是自仿射的或非线性的分形。

三、讨论与结论

1. 海原断层的整体维数和局部维数

上述结果表明，海原断层系的整体维数与局部维数是不一致的，说明了实际地震断裂带比自相似性质的理想断裂带更为复杂，应是多分维的或自仿射的。然而，由于自相似分形描述了自然界复杂事物的主要本质特征，可以将其看成是对复杂体系的一级近似处理，而把自仿射分形视为二级近似。因此，用自相似分形理论来探讨地震断层与其所形成的力学环境和地震活动性的关系是合理的。当然，应用自仿射分形理论来研究活动断裂带也许会得出更有意义的结果。

2. 断层几何与力学环境

众所周知，不同的力学环境中形成的断裂具有不同的典型几何结构，分维则是定量描述这种几何复杂性的重要参数之一，因此断裂带的分维与其形成的力学环境可能存在某种密切的关系。

表2给出了活动断裂带的分维与其周围力学环境的关系，表明了剪切断裂带具有较小的分维数，其典型值在1.1至1.3左右；而在张性环境中形成的断裂系统则具有较高的分维，其典型值在1.5至1.6左右。

表2 断层分维与力学环境的关系

活动断层	分维数	断层性质	作者
圣安德烈斯断层	1.33	剪切走滑	Okubo等
鲜水河断裂带	1.15	剪切走滑	马瑾等
海原断层系	1.137	脆性剪切破裂	周 尽
红河断裂带南段	1.32	剪切破裂	金邓辉等 ⁸⁾
红河断裂带北段	1.62	张性走滑	金邓辉等 ⁸⁾

3. 断层几何与地震活动

King和Turcotte^[7, 8]等都曾根据震级—频度及地震距—震级关系研究过断层几何和b值的关系，证明了b值规律是自相似断层几何（即分形）的必然结果。得到的分维D与b值的关系为：

$$D = d \times b / c \quad (6)$$

式中C为常数，根据观测结果一般取为1.5。对于二轴变形（二维自相似）， $d = 2$ ；对于三轴变形（三维自相似）， $d = 3$ 。他们认为可据此由b值来推算断层几何的复杂性。马瑾等则据此建议反推b值。他们分别推算了鲜水河断裂带西北段和东南段的分维数，用（6）式

8) 金邓辉等，红河断裂带的断层几何特征及其与地震活动关系，滇西潜在震源区的构造物理研究，90—112，1989。

取 $d = 2$, 分别得到西北段和东南段的 b 值为0.81和0.91。另外, 根据1970年以来2级以上的地震目录, 用Gutenberg-Richter公式求得这两段的 b 值分别为0.80和0.90。由此可见, 可利用断层迹线的复杂性来求 b 值, 从而帮助我们了解断裂带上的地震活动性。

图4是1954—1979年海原断层的地震震中分布图。可以看出, 中强地震主要集中在海原段, 在李俊堡段附近的固原和景泰也有分布。小震亦分布在这三个带上。据可用地震目录, 取海原断裂带(东经 $103^{\circ}40'$ — $106^{\circ}40'$; 北纬 $35^{\circ}40'$ — $37^{\circ}40'$)1972年1月1日至1989年12月31日发生的 $M_L \geq 2.4$ 的地震, 用2年时间窗1年步长滑动求出 b 值的变化曲线, 算出平均 b 值为0.868。把表1中海原断层的整体分维数 $D_0 = 1.137$ 代入(6)式, 则由断层分维求得的 b 值为0.853。这进一步证明了(6)式的正确性和普适性, 说明了断层几何的复杂性与地震活动密切相关。

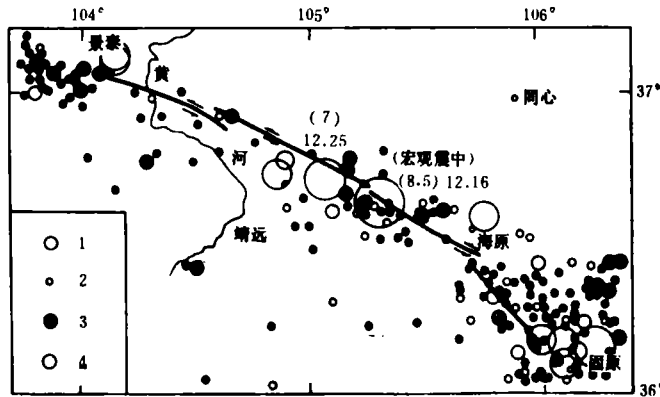


图4 1954—1979年海原地震带震中分布图(据刘百麓, 1983)

1. $M_s \geq 8$ 2. $M_s < 8$ 3. A、B类地震 4. C、D类地震

Fig. 4 The epicenter distribution of large and small earthquakes occurred on the Haiyuan seismic zone from 1954 to 1979

姚立珣等⁴⁾采用对地震震级的分形研究来代替对地震断裂长度的分形研究, 求出了1988年门源6.4级地震前河西地震带的分维数, 其中海原断裂带为1.14。这与本文的结果 $D_0 = 1.137$ 是一致的。

本文的计算结果说明, 在0.68至3.8km的尺度范围内海原断裂带整体与其景泰和海原分段基本在一个自相似的体系中。海原段的“无标度区”相对最宽, 其分维值相对最高, 说明其几何结构相对最复杂。

4. 断层系分维的测算

上述事实表明, 尽管分维有各种定义和多种计算方法, 但在用自相似分形对实际断裂带的复杂几何结构进行一级近似处理的情况下, 用圆复盖维数法求得的分维数是较为可靠的。根据本文的实际测算, 断层迹线图的比例、断层的完整性和活动性及分段性等因素都将影响所测算的分维值的精度。对断层研究工作越细致即断层迹线底图越完整, 分维的精度就越高。我们认为, 本文所选的比例(1:200000)是较合适的, 所选断层也较完整, 因此, 文中所得结果基本上反映了海原断层系的新构造运动特点、地震活动性和断层几何的复杂性。

4) 姚立珣等, 地震断裂系统的分维和地震预报方法探讨, 1989.

四、几点认识

通过对海原断层系分形特征的研究,得到以下认识:

(1) 具自相似层次结构的的活动断裂带广泛地存在于各主要地震活动带中,表征自相似断层几何复杂性的豪斯道夫维 D_0 与断层的应变释放、力学环境和地震活动性密切相关。

(2) 海原断层的几何复杂性具有自相似的层次结构,其整体维数 $D_0=1.137$ 。景泰段和海原段的维数分别为1.109和1.182;邵家水段和李俊堡段不具自相似性,可能具多分维性或自仿射性。

(3) 在研究实际断层系的分形特征时,注意分维测算中的尺度性和统一测算方法是很重要的,因为不同的方法或不同的尺度可能会得到不同的结果。

(4) 自相似分形广泛地存在于大自然的许多事物里,可将其视为这种复杂事物的一级近似。自仿射分形揭示了复杂事物更精细的层次结构,可作为二级近似。但如何将自仿射分形理论应用到地震研究中还有待进一步研究。

周俊喜同志为本研究提供了1:200000的海原断裂带底图,彭成斌同志对本文的初稿提出了一些有益的建议,在此一并致谢。

(本文1989年5月15日收到)

参 考 文 献

- [1] 陈顺等,分形与分维在地球科学中的应用,学术期刊出版社,1988.
- [2] Okubo, P. G. et al., Fractal Geometry in the San Andreas Fault System, JGR, Vol.92, No.B1, 345-355, 1987.
- [3] Aviles, C. A. et al., Fractal Analysis Applied to characteristic Segments of the San Andreas Fault, JGR, Vol. 92, No.B1, 331-344, 1987.
- [4] Mandelbrot, B. B., Fractal, Chance and Dimension, 365pp., W. H. Freeman and Company, San Francisco, Calif., 1977.
- [5] Mandelbrot, B. B., The Fractal Geometry of Nature, 468pp., W. H. Freeman and Company, San Francisco, Calif., 1983.
- [6] Mandelbrot, B. B., Self-affine Fractal Sets, in International Symposium on Fractal in Physics, ICTP, Trieste Italy, 8-28, 1985.
- [7] King, G., The Accomodation of Large Strains in the Upper Lithosphere of the Earth and other Solids by Self-similar Fault Systems, the Geometrical Origin of b-Value, PAGEOPH, Vol.121, No.5/6, 761-815, 1983.
- [8] Turcotte, D. L., A Fractal Model for Crustal Deformation, Tectonophysics, Vol. 132, 261-269, 1986.

FRactal Analysis Applied to Haiyuan Active Fault System

Zhou Jin

*(Seismological Bureau of Yunnan Province, Kunming, China)***Abstract**

Based on the covering dimension method for measuring the San Andreas fault system applied by P. G. Okubo, the fractal behavior of Haiyuan Quaternary active fault system has been investigated. The fractal dimensions for the entire fault system and its two of the four segments, Jingtai and Haiyuan, are obtained, i. e. $D_{AR}=1.137$, $D_{01}=1.109$ and $D_{02}=1.182$. The fractal dimensions for the other two segments, Shaojiashui and Lijunpu, aren't obtained, so the SL segments are self-affine or nonlinear fractals rather than self-similar ones. It may be seen that the real seismic faults are more complicated than ideal ones, should be multifractals or self-affine. Besides, the correlation between fault geometry and seismicity, mechanical circumstance around the fault system has been emphatically discussed. It further proves that the geometry complexity of self-similar faults is close to seismic activity, shear faults have lower fractal dimensions (1.1—1.3), but the fault systems formed in tensional circumstance have higher fractal dimensions (1.5—1.6). Finally, this paper discussed the effect of fault trace map, etc. on the measuring accuracy of fractal analysis.