

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*

卢新卫 马东升

(南京大学成矿作用研究国家重点实验室, 南京)

提 要: 根据分形理论计算了湘中各锑矿带断裂体系的计盒维数和信息维数。通过对各矿带断裂体系分维特征与锑矿分布之间关系的分析, 发现断裂体系的分维高值区与锑矿分布密集区相对应, 这不仅表明断裂是成矿流体运移的主要通道, 同时也表明断裂体系分维特征是定量描述锑矿床定位及成矿流体运移、聚集条件的一个重要参数。

关键词: 分维 断裂体系 成矿流体运移 矿床定位 湘中锑矿

分形理论^[10~12]自问世以来, 已发展成为非线性科学中的重要组成部分, 被广泛应用于众多领域, 尤其是对一些极其复杂和无规则性问题, 根据分形的观点都可以从中找到自相似结构, 并用分维对其进行描述, 从而揭示复杂事物中蕴涵的许多新的定量的规律。其中在地质研究领域内, 分形理论已广泛地应用于储层非均质性描述、孔隙结构特征、地震时空结构分析、断裂构造、油气及矿床分布预测等方面^[1~6, 13]。

当代成矿作用地球化学正围绕着矿质和矿液的来源、成矿流体运移的动力及过程、成矿流体迁移形式及其析出条件与机制等4个问题深入展开研究。其中成矿流体的运移和聚集是成矿作用过程研究中的一项重要内容, 也是目前矿床研究中相对较为薄弱的环节。事实证明, 断裂体系在矿床定位和成矿流体的运移和聚集过程中起着重要的控制作用, 特别是对于大型、超大型矿床的形成, 大通量流体的运移和聚集。为了量化地研究断裂体系对矿床分布和成矿流体运移及聚集的控制作用, 本文将分形几何理论与方法应用于湘中地区锑矿带断裂体系分形特征研究, 并探讨各分区断裂体系的分维值与锑矿分布及成矿流体运移聚集的关系。

1 断裂体系的分形结构及分维计算

1.1 断裂体系的分形自相似特性

分形的自相似性或标度不变性是 B B Mandelbrot 研究自然界广泛存在的不规则形态和复杂过程中得出的隐藏于混乱现象后的精细特征^[11], 也是地质过程中的普遍现象^[14]。分维数是用于描述分形结构复杂程度的定量参数, 它不同于欧氏几何中的拓扑维数, 一般为分数。

任何一个地区, 在地质作用过程中所形成的断裂有大有小, 即三级断层是一级和二级断

* 国家自然科学基金(49473186)和国家跨世纪优秀人才基金资助

第一作者简介: 卢新卫, 男, 1970年生, 南京大学地球科学系及成矿作用研究国家重点实验室博士生, 地球化学专业。邮政编码: 210093

1998-09-12 收稿, 1998-12-08 修改回。由陶景连编辑

层的派生断层，四级断层又为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。在各级断层和裂缝所构成的断裂体系内，不同级别的断裂（或裂缝）之间在空间分布上存在着统计意义上的自相似性，即在一定的尺度范围内所有断裂集合（断裂体系）具有分形特征。这就为应用分形理论研究断裂体系及其对成矿流体运移和矿床定位的控制作用提供了前提。

1.2 断裂体系分维值的计算

断裂的形成是岩石受地应力作用产生破裂和发生位移的一种重要的地质现象。从数字的观点来观察断裂的空间展布特征，这实质上是一系列无规则的线状或面状几何体集合。将这些无规则形状的几何体集合视为分形体，则可按分形几何学的方法定量地求得分形体空间分布特征的参数分维。分维是分形几何学中的一个十分重要的参数，其计算方法很多，本文采用计盒维数法和信息维数法来完成研究区断裂体系的分维计算。

(1) 计盒维数法：计盒维数法 (Box-counting dimension method) 实际上是 Hausdorff 维数 D_0 的一种具体实现。具体做法，以边长为 r 的正方形格子构成二维正交网格去覆盖断层体系所在的平面，在不断改变长度的取值下，分别计算出有断层穿越的网格数 $N(r)$ 。若 $N(r)$ 与 r 满足如下幂律关系

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

C 为常数，则研究对象为分形， D 为分维数。利用 (1) 式求取的分维也称熵维、容量维、对数密度等^[7]。显然，若在双对数坐标中 $N(r)-r$ 图为一一直线，则该直线的斜率为 $-D$ ，这种计算分维的方法称为计盒维数法。

(2) 信息维数法：计盒维数的计算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 (information dimension) 用于描述断裂的分布特征时，即考虑了盒子内是否有断裂穿过，同时也考虑到盒子内的断裂条数。断裂体系的信息维定义为：

$$D_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sum P_i(r) \ln P_i(r)}{\ln r} \quad (2)$$

式中， $P_i(r)$ 为断裂落入第 i 个边长（长度）为 r 盒子内的概率，也称为断裂强度^[15]。令 n_i 为第 i 个尺度为 r 的盒子内的断裂条数， N 为盒子总数，则这一概率为：

$$P_i(r) = n_i / \sum_{i=1}^N n_i \quad (3)$$

在实际计算中，令

$$I_1(r) = - \sum P_i(r) \ln P_i(r) \quad (4)$$

变换盒子边长 r 值，如果 $I_1(r)$ 与 $\ln r$ 之间存在线性关系： $I_1(r) = -D_1 \ln r + I_0$ ，则可由直线的斜率求出信息维数 D_1 。

2 湘中铋矿带断裂体系的分形分析

2.1 研究区地质背景

湘中地处江南古陆东南部，主要由震旦系和古生界（寒武系—二叠系）沉积盆地（即湘中盆地）组成。基底为元古界板溪群 (Pt_3) 和冷家群 (Pt_2)。该区具有较高的地质研究程度，

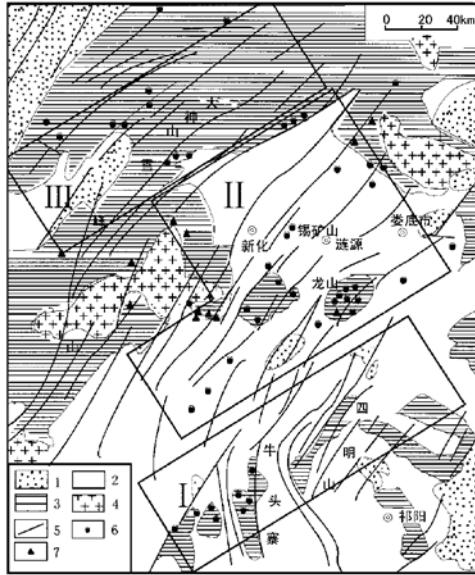


图1 湘中各锑矿带断裂体系及锑矿分布

1—三叠系—白垩系；2—泥盆系—二叠系；3—前泥盆系；4—花岗岩体；5—断裂；6—锑矿床（点）；7—金矿；I—四明山矿带；II—锡矿山—龙山矿带；III—大神山矿带

Fig. 1. Fracture system of various antimony metallogenic zones and distribution of antimony deposits in central Hunan.

1—Triassic—Cretaceous; 2—Devonian—Permian; 3—Predevonian; 4—Granite body; 5—Fault; 6—Antimony deposit (site); 7—Gold deposit; I—Simingshan Metallogenic zone; II—Xikuangshan—Longshan metallogenic zone; III—Dashenshan metallogenic zone.

拟合直线见图3。相关系数和分维值分别为：四明山矿带相关系数 $R=0.99962$ ，分维值 $D_1=1.7067$ （图3a）；锡矿山—龙山矿带相关系数 $R=0.99978$ ，分维值 $D_1=1.8102$ （图3b）；大神山矿带相关系数 $R=0.99979$ ，分维值 $D_1=1.5933$ （图3c）。显然，各矿带按计盒维和信息维大小排列顺序相同，即锡矿山—龙山矿带断裂体系的分维值最大，四明山矿带断裂构造的分维值次之，大神山矿带断裂分布的分维值最小。

3 断裂体系分维对成矿流体运移与矿床定位的指示作用

断裂构造体系分维值的大小受断裂分布密度、分布均匀程度、断裂长度以及断裂弯曲程

也是世界上最著名的锑矿产区。依据成矿背景以及矿产的空间分布，由东向西将湘中地区划分为3个锑矿带^[8]，分别对应于图1中的3个子区域。各矿带主要发育有NE向、NNE向及EW向等断裂构造，其中燕山期构造运动所产生NNE向各组断裂是成矿阶段运矿、容矿的主要构造^①。断裂构造在空间上，对锑矿床分布起了明显的控制作用（图1）。

2.2 各矿带断裂体系的分维特征

应用上述的计盒维数法分别对湘中地区四明山矿带、锡矿山—龙山矿带和大神山矿带进行断裂构造体系的分形分析，结果如图2所示。3个矿带分别用0.25~3 cm（约5~60 km）的网格覆盖，在有断层进入的网格数对格子边长的双对数坐标图中均呈现良好的线性关系（图2）。其相关系数和分维值分别为：四明山矿带相关系数 $R=0.99664$ ，分维值 $D_0=1.7346$ （图2a）；锡矿山—龙山矿带相关系数 $R=0.99971$ ，分维值 $D_0=1.8183$ （图2b）；大神山矿带相关系数 $R=0.99954$ ，分维值 $D_0=1.5975$ （图2c）。

在应用信息维数法计算各矿带的分维值时，尺度 r 的取值与计盒维数法尺度 r 的取值一致，各矿带上的 $I_1(r)-\ln r$ 的

① 湖南有色地质研究所研究室，1993，湖南省锡矿山锑矿床地质特征

度等影响^[9],是衡量断裂发育复杂程度的有效参数。四明山矿带和大神山矿带断裂数目、断裂空间分布密度虽然相同,但由于四明山矿带中断裂弯曲程度较大,因而该矿带断裂体系的分维值较大。上述各矿带断裂体系的分维研究结果表明锡矿山—龙山矿带断裂构造最为发育,四明山矿带断裂构造发育次之,大神山矿带断裂相对其他两个矿带不发育,这一结论正好与湘中地区各锑矿带的断裂展布相一致。各矿带分维值的差异表明湘中 3 个锑矿带内的断裂构造分属于分维值不同的 3 个自相似系统。

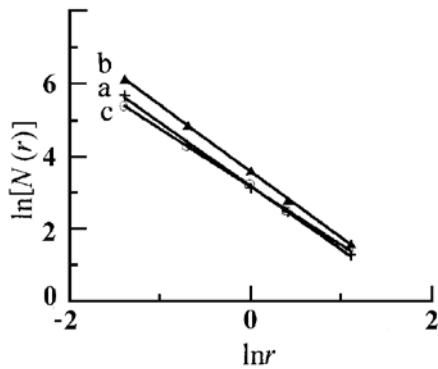


图 2 湘中各锑矿带断裂体系的 $\ln[N(r)]-\ln r$ 关系曲线

a—四明山矿带;b—锡矿山—龙山矿带;c—大神山矿带
Fig. 2. $\ln[N(r)]-\ln r$ diagram of fracture system in various antimony metallogenic zones of central Hunan.

a—Simingshan metallogenic zone; b—Xikuangshan—Longshan metallogenic zone; c—Dashenshan metallogenic zone.

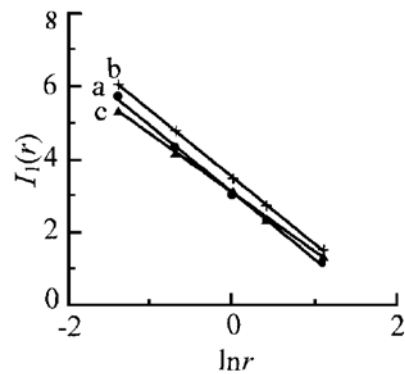


图 3 湘中各矿带断裂体系的 $I_1(r)-\ln r$ 关系曲线

a—四明山矿带;b—锡矿山—龙山矿带;c—大神山矿带
Fig. 3. $I_1(r)-\ln r$ diagram of fracture systems in various metallogenic zones of central Hunan.

a—Simingshan metallogenic zone; b—Xikuangshan—Longshan metallogenic zone; c—Dashenshan metallogenic zone.

各锑矿带断裂体系分维值的差异不仅表现了不同区域断裂体系分布在分形几何特征上的差异,同时也反映了湘中在地质演化过程中构造作用所产生的断裂在时空上的一种不平衡性和非均匀性,而研究表明断裂体系时空上的这种不平衡性和非均匀性与锑矿床的分布有着相当密切的内在联系。湘中地区锑矿床分布的分形研究结果表明^①,各矿带锑矿床分布的分维值与断裂体系的分维值呈正相关,即断裂体系分维值大的地区其锑矿床空间分布的分维值也大,锑矿产出数量较多,规模较大,分布较均匀;反之,断裂体系分维值小的地区,其锑矿空间分布的分维值小,锑矿产出较少,分布不均匀。这一研究结果与湘中各锑矿床的产出与分布相当吻合。

前文已经提到断裂体系分维值的大小显示了构造的复杂程度以及空间分布的均匀性。分维值大的区域,常是应力集中(释放)、断裂发育的地段,从而为成矿流体的运移、聚集提供了有利的运移通道和汇聚场所。成矿流体沿着断裂带(面)上升,在浅部的构造有利部位聚

① 卢新卫、金章东,湘中锑矿床空间分布的分形特征(铀矿地质,待刊)

集成矿。图2和图3表明锡矿山—龙山矿带断裂体系的计盒维和信息维值皆大于1.80,且较其它矿带大,该矿带内与锑矿成矿作用有关的NNE向断裂极为发育。相应地,该矿带锑矿床产出数量及规模也较其它矿带大,湘中80%的锑矿储量集中在该矿带^[7]。著名的锡矿山超大型锑矿床和龙山大型金锑矿床就产出于该矿带。可见,断裂体系的高分维特征是形成大型、超大型锑矿床的必要条件。结合已有的研究成果^①,可以得出只有当某一地区断裂体系的分维值大于其临界值(1.80左右)时,该区才有可能形成大型、超大型矿床。众所周知,大型、超大型矿床的形成及大规模矿化作用的发生,次级派生断层(延伸长度小于5 km)的发育及裂隙的贯通是必不可少的条件。为进一步探讨次级派生断层(及裂隙)的分维特征,在1:200000地质图上应用前文介绍的方法计算得知四明山矿带、锡矿山—龙山矿带和大神山矿带其次级派生断层的计盒维数分别为1.651、1.782和1.563。表明锡矿山—龙山矿带内次级派生断层的计盒维数较四明山矿带和大神山矿带大。各矿带内次级派生断层的信息维也具有类似的特征^①。各矿带次级派生断层的分维特征说明次级派生断层及裂隙在锡矿山—龙山矿带内最为发育。以上分析说明,锑矿床的定位、产出及成矿流体的运移与断裂构造存在着一定的内在规律,断裂构造体系分维值的大小可定量地刻画这一特征,即断裂构造体系的分维数可指示矿床定位及成矿流体运移的条件,分维数愈大,愈有利于成矿流体的运移、聚集以及大型矿床的形成。尤其当断裂构造体系的分维数大于其临界值时,更有利于大型、超大型矿床的形成及大规模矿化作用的发生。

4 结 论

(1) 研究区断裂体系在0.25~3 cm(约5~60 km)尺度范围内具有自相似性和分形特征,相关系数均超过0.99。

(2) 断裂体系分维相对高值区与锑矿床分布密集区存在着良好一致性。各锑矿带锑矿床空间分布的分维值与断裂体系分维值呈正相关。

(3) 断裂构造体系对成矿流体的运移聚集以及锑矿床的空间分布起着重要的控制作用,断裂体系分维值的大小是断裂体系空间分布复杂程度的度量,也是反映矿床定位及成矿流体运移条件的重要指标。断裂构造体系的分维值(计盒维和信息维)大于其临界值(1.80左右)是形成大型、超大型矿床及发生大规模矿化作用的必要条件。

参 考 文 献

- 1 陈程. 碎屑岩储层渗透率分布分维计算及其意义. 地质论评, 1995, 41 (1): 15~19.
- 2 四川地震局, 四川大学. 中小地震时间组织结构的无标度与大震前期征兆. 大自然探索, 1990, 9 (1): 38~41.
- 3 金章东, 卢新卫, 张传林. 江西德兴斑岩铜矿田断裂分形研究. 地质论评, 1998, 44 (1): 57~62.
- 4 金章东. 江西德兴铜厂斑岩体铜品位的分形结构. 矿床地质, 1998, 17 (4): 363~368.
- 5 沈忠民, 冯祖钧, 周光甲等. 断层体系分维与油田分布. 地球科学, 1995, 20 (1): 75~78.
- 6 沈步胜, 沈远超. 新疆某金矿的分维特征及其地质意义. 中国科学 (B), 1993, 23 (3): 297~302.
- 7 张济忠. 分形. 北京: 清华大学出版社, 1995: 1~140.

① 卢新卫, 马东升, 孔兴功. 湘中锑矿带断裂构造的信息维特征及其意义 (高校地质学报, 待刊)

- 8 史明魁, 傅赵勤, 勒西祥等. 湘中锑矿. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1994.
- 9 施泽进, 罗蛰潭, 彭大钧等. 非线性地质勘探研究导论. 成都: 四川科学技术出版社, 1995.
- 10 Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractal dimension. *Science*, 1967, 156: 636~638.
- 11 Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature. San Francisco: Freeman, 1982: 1~60.
- 12 Mandelbrot B B. Self-affine fractals and fractal dimension. *Physica Scripta*, 1985, 32: 257~260.
- 13 Aviles C A, Scholz C Z, Boatwright J. Fractal analysis applied to characteristic segments of the San Andreas fault. *J. Geophys. Res.*, 1987, 92: 331~344.
- 14 Turcotte D L. Implication of chaos, scale-invariance and fractal statistics in geology. *Global and Planetary Change*, 1990, 89: 301~308.
- 15 Agterberg F P, Cheng Q M, Brown A, Good D. Multifractal modeling of fractures in the Lac du Bonnet Batholith, Manitoba. *Comput. & Geosci.*, 1996, 22 (5): 497~507.

FRACTAL DIMENSIONS OF FRACTURE SYSTEMS IN ANTIMONY METALLOGENIC ZONES OF CENTRAL HUNAN AND THEIR INDICATING SIGNIFICANCE FOR MIGRATION OF ORE-FORMING FLUIDS AND LOCATION OF ORE DEPOSITS

Lu Xinwei and Ma Dongsheng

(State Key Laboratory for Research of Mineral Deposit, Nanjing University, Nanjing 210093)

Key words: fractal dimension, fracture system, migration of ore-forming fluid, locating of deposit, central Hunan

Abstract

The NE- and NNE-trending fracture system of all antimony metallogenic zones in central Hunan controls the migration of ore-forming fluids and location of antimony deposits. The formation of fractures is an important geological phenomenon of rocks which would produce fractures and migrate when subjected to stress. Observed from the mathematical viewpoint, the distribution of fractures is the set of a series of irregular line-shaped and plane-shaped geometric bodies. Regarding the irregular-shaped geometric body set as a fractal body, one can quantitatively calculate the fractal dimension of spatial distribution characteristics of the fractal body by using the fractal geometric method. The principles and methods of box-counting dimension and information dimension are applied to the study of fractal characteristics of the two-dimensional distribution of fracture structure in the antimony metallogenic zones, central Hunan. The results of calculation show that the fractal dimension of fractures of the Xikuangshan-Longshan metallogenic zone is bigger than that of the Simingshan metallogenic zone and the Dashenshan metallogenic zone. The difference of fractal dimensions of

fractures in various antimony metallogenic zones quantitatively indicates the fracture intensity and properties of fracture distribution, and also shows that the three antimony metallogenic zones of central Hunan belong respectively to three self-similar system with different fractal dimensions. From the analysis of relationship between fractal dimensions of fracture system of various metallogenic zones and the distribution of antimony deposits, it is found that the zones with high fracture fractal dimensions are consistent well with the distribution of large antimony deposits. This suggests that fractures are main channels for the migration of ore-forming fluids. It is also concluded that the fractal dimension of a fracture system is an important parameter for quantitatively describing location of antimony deposits and migration of ore-forming fluids.



(上接第 167 页 continued from p. 167)

sedimentary rocks intercalated with a small quantity of tuff, and volcanic substance is far away from the crater, forming the sedimentary volcanogene clastic reformation type bentonite deposits; in Ningcheng-Pingquan Neogenic rising volcanic basin, ore-bearing rocks are mainly volcanic rocks, while common sediments are rarely seen, so that there are chiefly volcanogene magmatic deposits, volcanogene clastic rock-lava reformation type bentonite deposits and zeolite deposits; in Guyuan-Zhenglanqi faulted volcanic basin at the center, the ore-bearing rocks are common volcanogene clastic rocks, volcanogene lava and sedimentary volcanogene clastic rocks, mainly forming complex zeolite deposits. The volcanic domes are related to volcanogene magmatic type, volcanogene lava reformation type and volcanogene clastic lava reformation type zeolite and bentonite deposits. The formation of perlite deposits and zeolite deposits is controlled by the volcanogene intrusive hillocks. Volcanic activities, volcanic petrofacies and volcanic petrology strictly control the formation of nonmetallic deposits of different geneses. A study of the relationship between petrochemistry and mineralization demonstrates that ore-forming protoliths of the volcanogene nonmetallic deposits in east Daqing Mountain region are perlite and volcanic glass rocks. Based on an analysis of the regional metallogenic geological setting, this paper indicates the ore-prospecting targets in eastern Daqing Mountain.