

快速逼近潜在超大型矿床的新理论和新方法*

李长江 麻土华 胡永和 朱兴盛

(浙江省地质矿产研究所, 杭州)

提 要: 将目前分形矿床学研究揭示的一些矿床分布的普遍性质与由非线性分析理论发展起来的空点数据处理技术 NASSD (Nonlinear analysis system for spatial data) 以及超低密度地球化学填图方法联系起来, 提出一种低投入、高效率寻找潜在超大型矿床的新方法。

关键词: 超大型矿床 分形和混沌 空点数据处理系统 (NASSD) 超低密度地球化学采样

1 引 言

由于一个现代化国家重要矿业的开发与工业基地的建设必须依托于一些超大型矿床, 因此有关超大型矿床的找矿问题近年来一直为世界各地的地质界和矿业界所重视。特别是如何快速和经济地探寻到潜在的超大型矿床靶区, 更是人们关注的一个重要问题。某些紧缺矿种超大型矿床的寻找在我国已迫在眉睫。

由 Mandelbrot (1982) 发展起来的分形理论是一门新的科学, 是用来描述自然界的规则以及复杂的现象和行为的。应用分形的理论和方法研究矿床地质, 从复杂的地质现象背后揭示元素迁移、富集和矿床形成与分布的分形机理, 探索矿床在时间和空间上的分布模式以及矿床储量和品位的分布规律, 总结矿产预测评价的分形统计学特征, 从而指导找矿勘查实践, 这样就形成了一门新的分支学科——分形矿床学。

本文的主要目的是将当前分形矿床学研究中揭示的一些矿床分布的普遍性质与由非线性分析理论发展起来的空点数据处理技术—NASSD (Nonlinear analysis system for spatial data, 李长江和麻土华, 1997) 以及超低密度地球化学填图方法 (谢学锦, 1996) 相联系起来, 提出一种低投入、高效率寻找潜在超大型矿床的系统追踪式找矿方法。

2 矿床空间分布的分形性质

如果把一地区 (乃至全球范围) 分成许多大小相等的单元, 必定是有些单元有矿床, 在有矿单元之间存在若干无矿单元。随后把有矿单元划分成更小的单元, 又可以发现有矿聚群和无矿的单元。但决不可能发现在一个单元内, 矿床是连续分布的。在任何一个有矿聚群中, 无论单元的尺度多么小, 只要大于单个矿床的线性尺度, 其中总会存在若干无矿的单

* 地质矿产部跨世纪科技人才基金资助 (9613) 研究的部分内容

李长江, 男, 1951 年生, 教授级高级工程师, 矿床地质专业, 现任浙江省地质矿产研究所总工程师。邮政编码: 310007

元。换言之，矿床的空间分布具有随机 Cantor 集的几何特性（李长江等，1994），这是一种分形结构。同样，如果以不同的时间间隔划分单元，考察矿床在地史时期的分布，可以预料，类似随机 Cantor 集的规律性仍然存在。

根据 Turcotte (1989) 给出的分形集合概念，一个分形集合可以定义为

$$N_i = \frac{C}{r_i^D} \quad (1)$$

式中 N_i 是具有特征线度为 r_i 的物体的数目， D 为分维数， C 是比例常数。

由式 (1) 可考察矿床在空间上的分形丛集分布特征。在不考虑单个矿床之间在体积和赋矿深度上的差别时，将整个研究区域划分成边长为 r_i 的若干正方形格子，当格子大小 r_i 不同时，分别统计出有矿格子数 N_i 。 N_i 显然与 r_i 有关，将 N_i 与 r_i 投在双对数坐标图上，如果两者关系是一条直线的话，则表明在所采用的标度范围内，矿床在空间上是分形丛集分布的，其直线部分的斜率即为式 (1) 的 D 。

图 1、2 和 3 分别表示用上述方法对浙江萤石、金、银、铅锌矿床、中国金矿床以及美国西部盆岭区热液贵金属矿床进行统计的结果。这些结果表明，尽管研究地区的面积不等，地质背景各异，矿床种类也不尽相同，但矿床在空间分布上都具有一种共同的特征，即遵循分形丛集分布，并且普遍地存在两个无标度区间。其中，如图 1 和 3 所示，浙江的萤石、

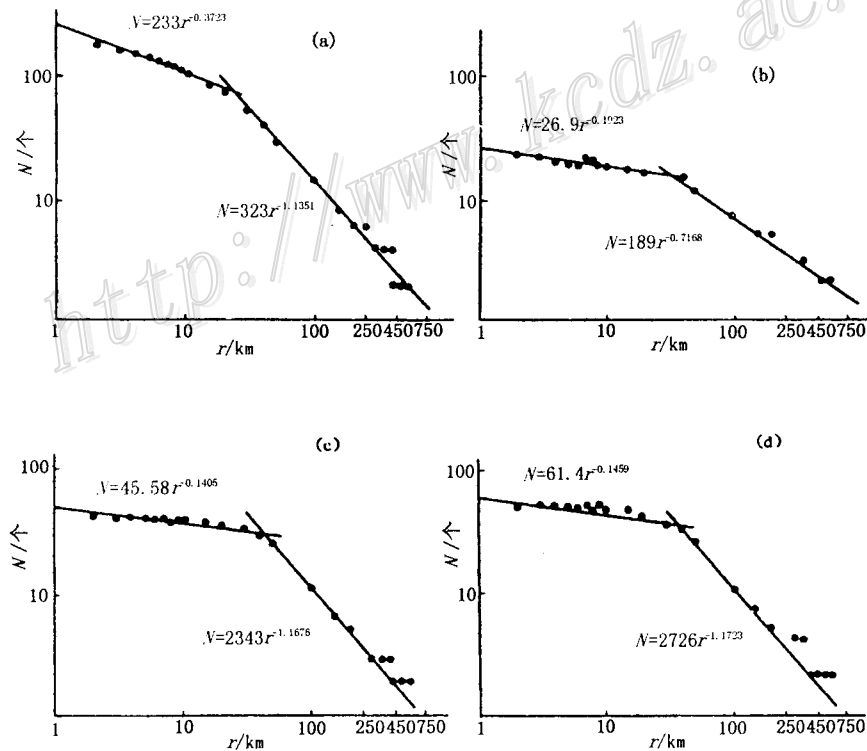


图 1 浙江矿床 r (群集直径)- N (群集数) 图解

(李长江等, 1996)

a—萤石矿床; b—金矿床; c—银矿床; d—铅锌矿床

金、银、铅锌矿床为 2~20 km ($D = 0.1405 \sim 0.3778$) 和 20~750 km ($D = 0.7168 \sim 1.1851$)，美国西部贵金属矿床为 2~15 km ($D = 0.5048$) 和 15~1000 km ($D = 1.5109$)。鉴于本文的目的以及篇幅所限，这里暂不讨论 D 值的地质意义，而要指出的是，前一个尺度可能反映了在矿田范围内矿床具有分形分布的特征，后一尺度则表示了矿田之间在空间上也是分形分布的。图 2 是对整个中国已知金矿床的统计结果，两个无标度区的范围分别是 20~150 km ($D = 0.2993$) 和 150~5000 km ($D = 1.3073$)，其前者可能揭示了金矿床(田)密集区的尺度，并且在该尺度内金矿床(田)呈分形分布；后者则说明金矿床(田)密集区之间在空间上也是分形的。这些统计结果与前面关于矿床的空间分布具有随机 Cantor 集的几何特性的结论一致。

3 矿床储量分布的分形性质

根据矿床的分布具有随机 Cantor 集的几何特性，我们(李长江等, 1994)曾建立了矿床的储量分形模型

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{M}{M_0}\right)^{-D/3} \quad (2)$$

这里 N_0 是具有某一确定储量 M_0 的矿床的数目， N 是储量 M 大于 M_0 的矿床的数目。如果以 N_c 表示储量大于 M 的矿床的累积数，则式 (2) 可改写成

$$N_c \sim M^{-D/3}$$

或

$$N_c = C \cdot M^{-D/3} \quad (3)$$

我们(李长江等, 1994, 1996)对浙江、中国和世界范围内萤石、金、银、铅锌、钨、锡、铜、汞以及石油和天然气等总计 3000 余个矿床的统计结果表明，矿床的储量-频度关系遵循分形统计学可能是一种普遍的现象。作为例子，图 4 给出了对铜矿床的统计结果。根据一地区已知矿床的储量-频度分形关系，可以对该地区大于某一指定储量的潜在矿床数进

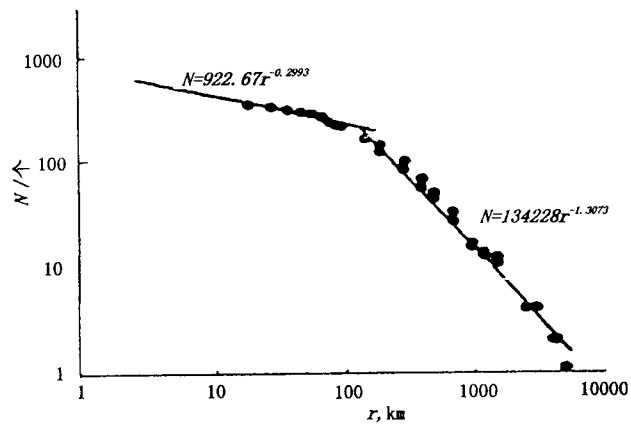


图 2 中国金矿床 r (群集直径)- N (群集数)图解
(由施俊法提供)

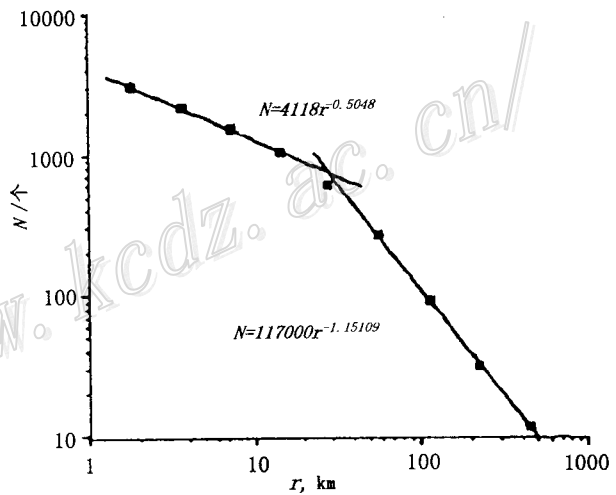


图 3 美国西部盆岭区热液贵金属矿床 r (群集直径)- N (群集数)图解
(Carlson, 1991)

行预测。

4 成矿作用的混沌动力学性质

柳志青(1996)对目前全世界已知的1600余个超大型矿床(包括金属、非金属和能源矿床)的统计结果表明,其中96.7%集中分布在112个密集区内,仅不足4%的超大型矿床

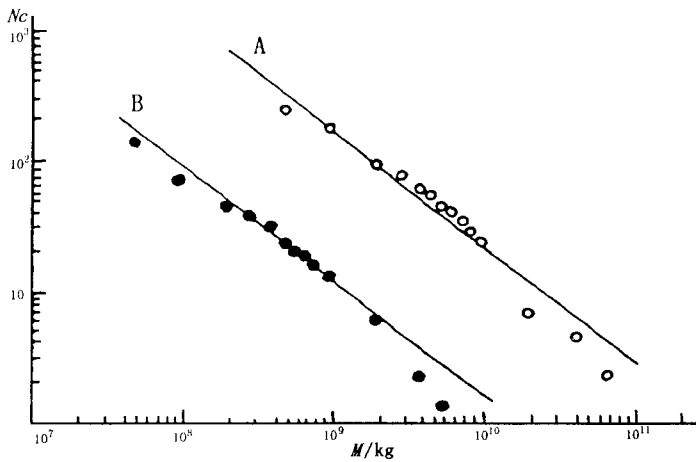


图4 铜储量大于M的矿床数N与M的关系

A—世界铜矿储量分形线, $D=2.960$ (储量大于50万吨, 206个);

B—中国铜矿储量分形线, $D=2.968$ (储量大于5万吨, 125个)

呈星散分布。并且不同时代、不同矿种、不同成因类型的超大型矿床常常出现在同一个密集区内。在同一密集区内的矿床,特别是一些大型、超大型矿床又往往集中在少数几个矿田。在一个矿田中,尽管可以有許多矿床和矿点产出,但往往是一、二个矿床占据了矿田矿石储量的绝大部分。此外,据戴自希等(1994)^①统计,国外近年来新发现的矿床,无论金属矿床还是油气矿床,90%以上是在已知成矿区,或者老矿区的附近、外围和深部。这些事实表明,在地球形成

以来的演化过程中,尽管这个过程极其复杂,但是各种成矿活动(元素聚集过程)似乎在追随地壳上一些“特定”的地方,或者说有一些“特定点(区域)”在“吸引”着成矿活动的轨迹。

许多野外地质观察表明,在同一矿区或矿田,同一地质体中,力学性质相似,近乎平行分布的多条断裂中,常常仅是其中一、二条断裂成矿,或者是矿床往往集中在个别断裂中。在分叉断裂中,常可见到仅是其中的一个分支断裂含矿,而另一断裂不含矿或矿化很弱。又例如在中国华南,同时期侵入于同一地层,具有相同岩性,相似大小的花岗岩体,常常是有的形成了脉钨矿床,有的则无矿。这些现象暗示了成矿作用具有对初始微小差异的敏感性。

将上述事实以及矿床在空间(乃至时间)分布上所表现出的随机Cantor集结构或分形丛集性与Lorenz(1993)关于混沌的定义加以比较,我们有理由相信成矿活动是混沌的。

在先前的研究中(李长江等,1996;麻土华等,1998),我们建立了成矿作用的非线性动力学模型,该模型的迭代关系式与Logistic方程一致,可表示为

$$x_{n+1} = \lambda x_n (1 - x_n) \quad (4)$$

其中, $x_{n+1} - x_n$ 表示第 n 次地质作用前后成矿元素含量(或矿床储量)的变化; $\lambda = 2 + 2x_0 / [(k_1/k_2) \cdot y_0 - 2x_0]$, x_0 和 y_0 分别表示成矿区和背景环境岩石的成矿元素初始含量; k_1 和

① 戴自希等(1994),我国急缺矿产找矿的途径和对策,中国地质矿产信息院

k_2 为速率常数 ($k_1 \neq k_2$)。

上述模型可以解释许多实际的元素含量与矿化分布特征 (麻士华等, 1998) 当 $3.57 < \lambda < 4$ 时, x_n 成为混沌状态, 并表现出在几何分布上具有 Cantor 集性质的混沌吸引子的带 (麻士华等, 1998)。由于恒有 $k_1/k_2 > 0$, 且 $x_0 \in (0, 1)$ 及 $y_0 \in (0, 1)$, 所以无论岩石中成矿元素含量高低, 即不论 $x_0/y_0 \geq 1$, 还是 $x_0/y_0 < 1$, 只要满足 $3x_0/y_0 < k_1/k_2 < 3.274x_0/y_0$, 都将导致 $3.57 < \lambda < 4$ 成立, 从而使 x_n 呈现混沌状态, 这表明导致 $3.57 < \lambda < 4$ 的 x_0 、 y_0 和 k_1/k_2 的取值范围是相当宽的, 从而说明了元素的迁移、聚集与成矿通常是在混沌中进行的。由此, 就不难理解为何矿床在空间分布上普遍地遵循分形丛集分布, 为什么全球的超大型矿床总是丛集出现在一些“特定”的区域, 以及为什么地质条件极其相似的不同地区, 其含矿性往往迥然不同。根本的原因可能就在于矿床的形成是在混沌中进行的。由于混沌吸引子就是分形集, 所以现今的矿床在空间分布上所具有的 Cantor 集结构或许正是成矿活动这个混沌系统演化的吸引子在空间标度下的表现形式。

5 基于分形几何原理的超大型矿床找矿方法

如果上述认识是正确的, 那么对于今后超大型矿床找矿靶区的选择, 除了目前还人迹罕至或工作程度甚低的极少数地区外, 主要的应该是那些目前已知的超大型矿床密集区、大型和中型矿床密集区。对于这些地区, 可以通过对矿床空间分形 (丛集分布和密度分布, Carlson, 1991; 李长江等, 1994、1996) 和储量分形的研究来进一步评价发现超大型矿床的潜在可能性。可以预料, 在全球范围内, 今后发现的重大矿床, 绝大部分仍然在那些已知的超大型 (大型) 矿床密集区及其附近。

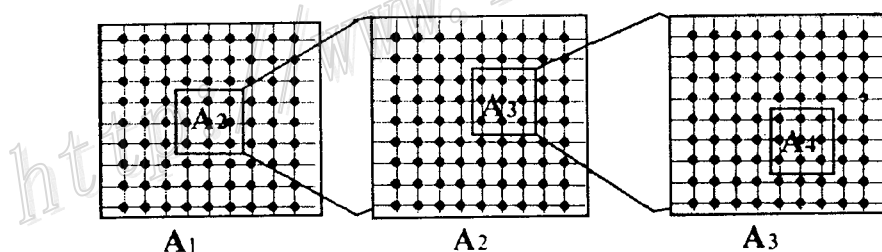


图 5 表示应用 NASSD 技术与超低密度地球化学填图结合的系统追踪式找矿程序。首先对较大的范围 (A_1) 进行超低密度采样, 应用 NASSD 处理数据, 筛选出异常含量区 (A_2)。然后, 对 A_1 增加取样密度, 再应用 ASSD 对 A_2 区的数据进行处理, 筛选出 A_3 , 如此操作, 逐步逼近靶区

对于目前地质工作程度还很低, 尚未发现大型、超大型矿床矿化密集区的那些地区, 根据矿床分布所遵循的分形几何学原理, 采用恰当的工作“尺度”, 则可以提高预测评价的工作效率。

如前所述, 中国金矿床 (田) 密集区的空间无标度区范围为 20~150 km, 且在 150~5000 km 范围内, 金矿床 (田) 密集区亦呈分形分布。其它如铜、铅锌等矿床 (田) 在空间上呈分形分布的无标度区范围可能也不会与这个尺度相差太大。由此, 我们就有理由相信,

采用谢学锦(1996)倡导的,以泛滥平原沉积物为采样介质,以160 km×160 km为采样网格(约每25000 km²一个样)的超低密度地球化学填图方法,一般是不会漏掉线性尺度为20~150 km的矿床(田)密集区。将这种超低密度地球化学采样方法与我们(李长江和麻土华,1997)发展的用于空间点数据处理的非线性分析系统——NASSD(Nonlinear analysis system for spatial data)结合起来,即以图5所示的系统追踪式找矿方法,可以快速地逐步缩小靶区范围,筛选出潜在的超大型、大型矿床靶区。我们初步的试验结果(李长江和麻土华,1997)已表明,对于像中国西部这样的地质工作程度较低的地区,这将可能是一条逼近潜在超大型矿床的高效率、低成本的可行途径。

在研究中得到谢学锦院士的鼓励与指导,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 李长江,徐有浪,蒋叙良.论矿床的分形性质.浙江地质,1994,10(2):25~32.
- 2 李长江,蒋叙良,麻土华.浙江中生代热液矿床的分形研究.地质科学,1996,31(3):264~273.
- 3 李长江,麻土华,徐有浪.对浙江地质找矿的几点思考.浙江地质,1996,12(2):62~67.
- 4 李长江,麻土华.化探数据处理的新技术.地质找矿论丛,1997,12(4):57~64.
- 5 柳志青.超大型矿床全球分布规律和岩石圈形成与太阳系起源的成因联系.浙江地质,1996,12(1):1~32.
- 6 谢学锦.勘查地球化学的现状与未来展望.地质论评,1996,42(4):346~356.
- 7 Carlson C A. Spatial Distribution of Ore Deposits, Geology, 1991, 19(2): 111~114.
- 8 Li Changjiang, Ma Tuhua and Xu Youlang, A New View : Chaotic Dynamical Nature in Mineralization , 30th International Geological Congress Abstracts, 1996, Volume 3 of 3: 491.
- 9 Lorenz E N. The Essence of Chaos, the University of Washington Press, 1993.
- 10 Ma Tuhua , Zhu Xingshen and Li Changjiang, Chaos Dynamic Behaviour of Mineralization, Acta Geologica Sinica, 1998, (in the press).
- 11 Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature , 1982, Freeman San Francisco.
- 12 Turcotte D L. Fractals in Geology and geophysics, Pure Appl. Geophys, 1989, 13 1: 171~196.