

# 中国金矿床分布的分形研究

丁式江 翟裕生 邓军  
(中国地质大学,北京,100083)

**内容提要** 根据1:400万中国岩金成矿图,在矿床地质研究基础上,用分形理论探讨了中国岩金矿的空间分布。研究表明,在两个尺度范围内,金矿床在空间上呈分形分布,其中数盒子法的分维数 $D$ 分别为0.3333(5~80 km)和1.3259(80~2400 km);密度分布的分维数 $D$ 分别为1.2033(5~80 km)和1.5459(80~2400 km)。金矿床的分形分布给超大陆旋回会聚构造边缘控制金矿的分布及成矿作用的观点以有力的佐证。

**关键词** 分形 金矿床 中国

分形理论<sup>[1~3]</sup>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深刻而定量的规律。

有关矿床的空间分布模型,一些学者提出了泊松分布、负二项式分布及Neyman-Scott分布等<sup>[4,5]</sup>。Mandelbrot<sup>[2]</sup>首先提出矿床空间分布模型为分形集。近年来研究表明,贵金属矿床空间分布在两个标度范围内具分形特征<sup>[6,7]</sup>。矿床的分形分布预示成矿热液体系及裂隙系统具分形特征,因而分维可定量地描述矿床的分布规律。

本文旨在运用分形理论研究中国金矿床的空间分布特征,其数据来自1994年武警黄金地质研究所编制的1:400万中国岩金成矿图<sup>①</sup>,不考虑砂金矿床的分布,共收集了988个金矿床数据,包括超大型、大、中、小型及金矿点的分布,若矿床间距离小于5 km,则作为一个矿床处理。

## 1 金矿床地质特征

中国地域辽阔,黄金资源丰富,成矿作用多样。在分布特征上表现为巨型深断裂体系控制金矿的总体分布。如古亚州断裂体系、滨太平洋断裂体系和特提斯—喜马拉雅断裂体系,其发生、发展、交切、复合,相应地控制了金矿的成矿作用及空间展布格局。成矿时间上有两个高峰期,即古生代和元古宙。所有金矿带或大型金矿床均位于重力梯级带上或其附近,说明金矿带与地幔隆起异常带有一定空间关系。赋存金矿的主岩主要有:①太古宇—古元古界变中基性火山—沉积杂岩系,属于绿岩带,是中国东部重要类型金矿床的主要围岩。②古生界变基性火山岩系,主要分布于中国西北地区,由变细碧岩、玄武岩、角斑岩、英安岩、变辉绿岩等熔岩及凝灰质砂岩等组成,属于绿色岩系。③元古宇及古生界—三叠系变碎屑岩系,主要为板岩、

注:本文为地质矿产部“九五”攻关项目(95-02-013)成果的一部分。

① 武警黄金地质研究所编.中国岩金成矿图及说明书.1994.

本文1997年7月收到,11月改回,章雨旭编辑。

千枚岩、片岩类与变砂岩等(一部分为碳酸盐岩),不同程度地含有碳质和以黄铁矿为主的原生硫化物,即所谓黑色岩系。

以容矿岩系为基础结合矿化体的产出形式,将中国岩金矿床分为10类<sup>①</sup>。①绿岩型金矿:该类金矿集中分布在华北地台边缘,处于地台与显生宙碰撞造山带或陆内造山作用较强的地区,如小秦岭、胶东、清原—桦甸、冀北—辽西与乌拉山—大青山等地区。②浊积岩型金矿:金矿化带主要分布在基底构造隆起区及陆缘裂陷海槽区,并受深断裂的控制。③卡林型金矿:主要分布在扬子地台与华南褶皱系及松潘—甘孜褶皱系嵌合地带和秦岭褶皱系西段。④产于花岗岩类侵入体内及内外接触带中的金矿:成矿作用与重熔和同熔花岗岩类侵入活动有关。⑤产于碱性侵入岩体中的金矿:本类金矿是指空间上与碱性侵入岩伴生,在成因上与其有关的金矿床。⑥产于显生宙镁铁质岩(包括蛇绿岩套)中的金矿。⑦产于中、新生代陆相火山岩系中的金矿:这类金矿主要分布于地台活化区的中生代断陷盆地边缘,或太平洋岛弧火山岩带。深大断裂既控制着断陷盆地,也控制着火山岩的展布,矿体受火山岩(或潜火山岩)构造控制。⑧砾岩型金矿:该类金矿多分布于中、新生代断陷盆地的边缘,层位稳定,规模较大。⑨伴生金矿:主要与Cu矿床伴生,分布在长江中下游地区。⑩产于风化壳中的金矿。

## 2 方法

本文采用两种方法计算金矿床空间分布的分维数,即数盒子法和密度法。

方法一:数盒子法(box-counting method)

采用Mandelbrot<sup>[3]</sup>推广的数盒子法,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 $\delta$ 的若干正方形格子,当格子的大小 $\delta$ 不同,分别统计出有矿格子数 $N(\delta)$ ,显然 $N(\delta)$ 是 $\delta$ 的函数。如果有:

$$N(\delta) \propto \delta^{-D}$$

$$\text{或 } N(\delta) = C\delta^{-D} \quad (1)$$

$C$ 和 $D$ 是常数,则矿床是分形分布的,且 $D$ 为分维数,以 $N(\delta)$ 与 $\delta$ 作双对数图,其直线的斜率即为(1)式中的 $D$ 。

方法二:密度法(density method)

了解距离某一矿化中心的矿床分布,对于找矿勘探有重要的指导意义。设矿床分布的平面点集 $S$ ,以每个矿床点 $P_i \in S$ 为中心,不同的半径 $r_k$ 画圆,求落入此圆中矿床点的数目 $N_i(r_k)$ 。对点集 $S$ 中每一矿床点为圆心,同一半径的 $N_i(r_k)$ 求平均值:

$$N(r_k) = \frac{1}{N} \sum N_i(r_k), (k = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

则矿床点数 $N(r)$ 是圆半径 $r$ 的函数。如果有

$$N(r) = Cr^D \quad (3)$$

$$\text{或 } \rho(r) = \frac{C}{\pi} r^{D-2} \quad (4)$$

式中 $C$ 和 $D$ 是常数, $\rho(r)$ 为密度,即距离某一已知矿床一定距离 $r$ 的单位面积的矿床数,则矿床是分形分布的,且 $D$ 为分维数。

① 陈纪明等. 中国岩金地质概论. 1993.

### 3 结果

图 1a 表示用数盒子法所得的中国金矿床分布的分维特征,图左侧的分布斜率为 $-0.3333$  ( $5\sim 80$  km);右侧的斜率为 $-1.3259$  ( $80\sim 2400$  km)。不存在维数等于 0 或 $-2$ 的情况,且直线拟合较好,线性拟合度分别为 0.9853 及 0.9978。表明中国金矿床在空间上是分形分布的。图 1b 显示矿床密度也符合分形分布,同样存在两个无标度区, $5\sim 80$  km 和  $80\sim 2400$  km 尺度内

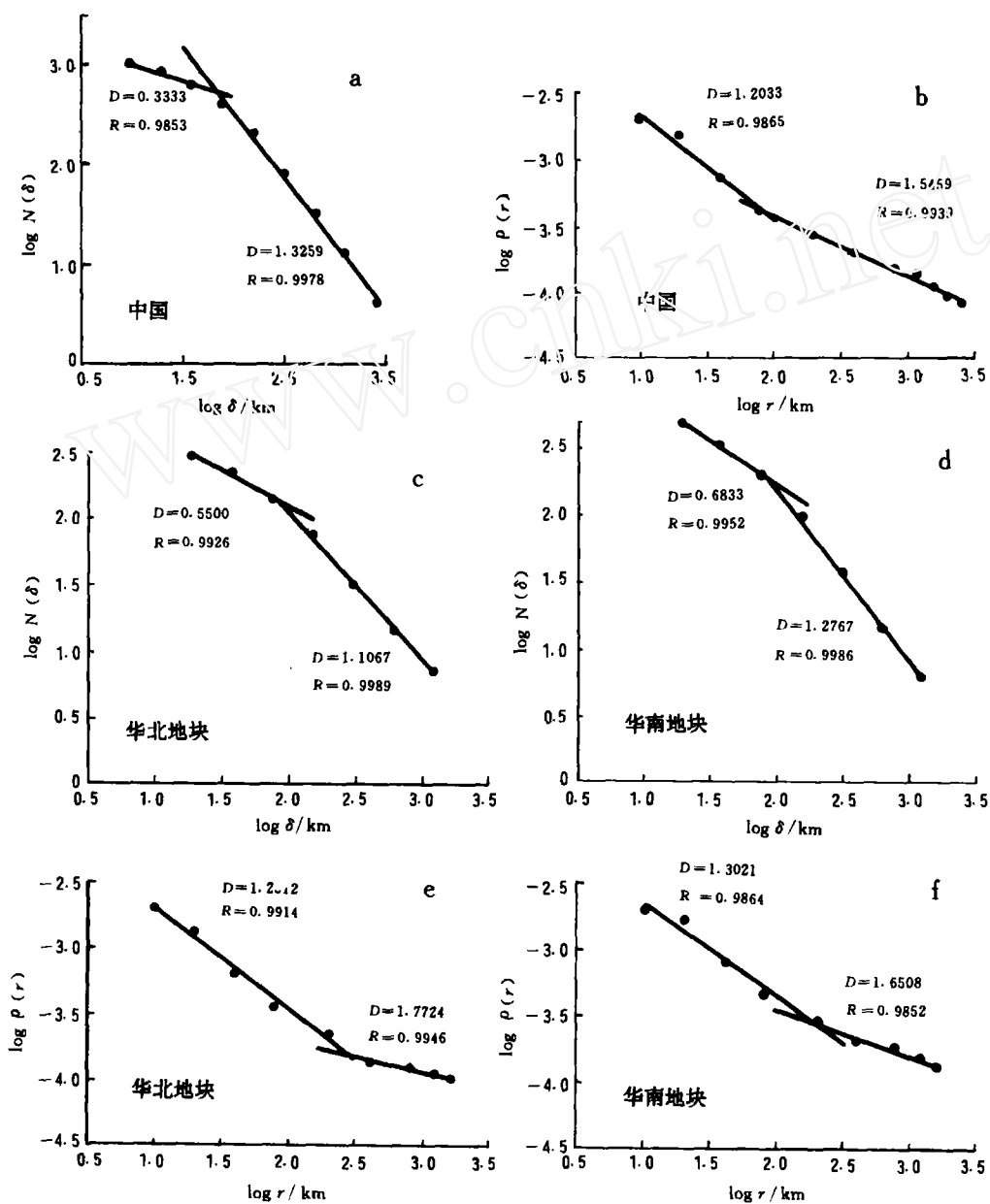


图 1 中国金矿床数目( $N$ )/密度( $\rho$ )与网格大小( $\delta$ )/距离( $r$ )双对数图(说明见正文)

Fig. 1 Log-log plot of  $N/\rho$  and  $\delta/r$  of gold deposits in China

的斜率分别为 $-0.7967$ (分维数  $D1.2033$ )和 $-0.4541$ (分维数  $D1.5459$ ),线性拟合度较好, $R$ 分别为 $0.9865$ 和 $0.9939$ 。为研究不同构造单元金矿床分布特征,笔者分别对华北地块与华南地块金矿床分布进行了统计。结果表明,两者均符合分形分布,存在二个无标度区,华北地块盒维数为 $0.5500(5\sim 80\text{ km})$ 和 $1.1067(80\sim 1200\text{ km})$ (图 1c),线性拟合度分别为 $0.9926$ 及 $0.9989$ ;华南地块盒维数为 $0.6833(5\sim 80\text{ km})$ 和 $1.2767(80\sim 1200\text{ km})$ (图 1d),线性拟合度分别为 $0.9952$ 和 $0.9986$ 。华北地块金矿床密度分布的分数维为 $1.2312(5\sim 200\text{ km})$ 和 $1.7724(200\sim 1200\text{ km})$ (图 1e),线性拟合度分别为 $0.9914$ 及 $0.9946$ ;华南地块金矿床密度分布的分数维为 $1.3021(5\sim 200\text{ km})$ 和 $1.6508(200\sim 1200\text{ km})$ (图 1f),线性拟合度分别为 $0.9864$ 及 $0.9852$ 。

#### 4 讨论与结论

两种方法所计算的中国金矿床分布的结果有些差异,数盒子法在各个尺度范围均比密度法有较小的分维数,且有较高的分辨率。从华南与华北地块金矿床分布来看,盒维数能更准确地刻划出局部的自相似结构,而密度分维反映的是较大尺度范围内的自相似结构,因而两种方法具互补性。

中国金矿床在两个尺度范围内( $5\sim 80\text{ km}$ 及 $80\sim 2400\text{ km}$ )是分形分布的。与美国西部盆岭区贵金属矿床及津巴布韦绿岩型金矿床的空间分布在标度尺度上有一定的差异(表 1)。表明全球各地成矿控制因素有一定的差异,也可能与统计时所采用的比例尺有关。

华南与华北地块区域构造演化格局不同,在成矿作用上有一定的差异,因而金矿床空间分布上也不尽相同。华南地块比华北地块的盒维数稍大,表明华南地块的金矿床分布更密集,可能预示着华南地块有较强的金成矿能力。 $5\sim 200\text{ km}$ 范围内,华北地块比华南地块的密度分维小,表明在这一尺度范围内,华北地块金矿床分布较华南地块更密集,而 $200\sim 1200\text{ km}$ 范围内则反之。这一结果可能暗示着华南地块有较密集的金矿化集中区,而华北地块则有较密集分布的金矿田。华南、华北及中国金矿床分布均

表 1 中国及其它地区金矿床分布的分形特征  
Table 1 Fractal dimension of gold deposits distribution in China and other regions

国家或地区	范围(km)	分维	拟合度	矿床数	方法	资料来源
中国	5~80	0.3333	0.9853	988	方法 1	本文
	80~2400	1.3259	0.9978			
	5~80	1.2033	0.9865		方法 2	
	80~2400	1.5459	0.9939			
中国华北	5~80	0.5500	0.9926	327	方法 1	本文
	80~1200	1.1067	0.9989			
	5~200	1.2312	0.9914		方法 2	
	200~1200	1.7724	0.9946			
中国华南	5~80	0.6833	0.9952	568	方法 1	本文
	80~1200	1.2767	0.9986			
	5~200	1.3021	0.9964		方法 2	
	200~1200	1.6508	0.9852			
中国浙江	1~40	0.192			方法 1	[8]
	40~750	0.717				
	1~40	0.369			方法 2	
40~750	0.251					
美国盆岭区	1~15	0.50		4775	方法 1	[6]
	15~1000	1.51				
	1~15	0.83			方法 2	
15~1000	1.17					
津巴布韦 Masvingo	0.3~2.5	0.33	0.947	147	方法 1	[7]
	2.5~29	1.12	0.995			
	0.15~2.5	0.69	0.958		方法 2	
	2.5~22.5	1.06	0.994			
津巴布韦 Shamva	0.3~2.5	0.28	0.988	122	方法 1	
	2.5~29	1.18	0.999			
	0.15~2.5	0.87	0.991		方法 2	
	2.5~22.5	1.01	0.997			

以 80 km 为界,在两个标度区内呈分形分布,表明控制金矿床分布的主要因素是构造。

小于 80 km 范围内金矿床的分形分布显示矿田范围内成矿系统(控矿因素)具自相似性。而 80~2400 km 矿床的分形分布显示大型构造或成矿省的控制因素的自相似性,因而以大于 80 km 的构造作为大型构造可能是合适的。密度法中,华北与华南地块金矿床均以 200 km 为界,在两个标度区内呈分形分布,可能隐含着如下信息:5~200 km 范围内矿化集中区成矿系统具自相似性,而 200~1200 km 尺度金矿床的分形分布显示出各矿化集中区间控矿因素的自相似性。大于 200 km 的超大型构造,往往是地体或增生构造的边界,由于地体间周期性地聚合和解体,导致深部含矿热液周期性地生成释放,而流体产生和运移途径受到主要地体的边界断层和较高次序的断裂所影响。近年来提出的超大陆旋回会聚构造边缘控制金矿的分布及成矿作用的观点显然在金矿床空间分布上得到了佐证,从中国东部金矿床的分布来看,郯庐断裂带无疑起着重要的控制作用<sup>[9]</sup>。流体沿着超壳断裂带运移,由于郯庐断裂带的地震泵吸作用,导致在深断裂旁的次级构造中形成诸多金矿集中区。

导致矿床形成的物理和化学过程在相当大的尺度范围内是分形的,这些矿床均属于受不同等级断裂、裂隙系控制的热液矿床,且热液体系、岩浆体系也是分形的<sup>[6]</sup>。对中国大陆不同时代、不同规模的深断裂系研究表明具分形分布<sup>[10]</sup>。孙启祯<sup>[11]</sup>提出的边缘成矿论,是造成矿床空间分布自相似现象的地质依据。由此表明,基本地质作用及控矿因素的自相似性,导致了金矿床空间分布的自相似性。

80 km 处金矿床分布有极为明显的变化,小尺度范围内有较大的矿床密度。Blenkinsop<sup>[7]</sup>解释为可能与已知矿床周围勘查工作程度较高有关。柳志青<sup>[12]</sup>注意到,在热液成矿过程中,以络合物真溶液形式运移的成矿物质在络合物发生分解从流体中析出时,并不立刻沉淀,而是以  $10^{-3} \sim 10^{-7}$  cm 大小的矿物微粒继续随成矿流体在裂隙内运移。只有当矿物微粒间不断碰撞凝聚至一定大小时才发生沉淀。如果这一凝聚或沉淀过程从热液系的某一点(矿化中心)开始后,不断地继续下去,在一定的时间和空间范围内形成聚集或富集,即成为矿体,并且会形成从矿化中心向周围分叉伸展的分形结构;随着矿质不断沉淀和枝状分形集团的生长,热液体系的矿质浓度将减小,在各沉淀点聚集的矿物质量就会越来越小,凝聚沉淀前的运移距离也越来越大,从而产生矿床的密度分布随矿化中心的距离增大而减小的分形分布现象。这一机制类似于 DLA 模型(受限扩散凝聚模型<sup>[13]</sup>)。

矿床密度分布的分形现象具有重要的勘探意义,我们可以在一定尺度区内对已知矿化中心周围的未勘探区的矿床数量和密度进行估计。

## 参 考 文 献

- 1 Mandelbrot B B. How long is the coast of Britian? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 1967, 156: 636~638.
- 2 Mandelbrot B B. *The fractal geometry of nature*. New York: W H Freeman and Company, 1983. 468.
- 3 Mandelbrot B B. Self-affine fractals and fractal dimension. In: *Physica Scripta*, 1985, 32: 257~260.
- 4 Griffiths J C. Frequency distribution of some nature resource materials (Technical conference on petroleum production, 23rd, 1962). Mineral industry experimental station circular 63, 1962. 174~198.
- 5 Agterberg F P. Spatial clustering and lognormal size distribution of volcanogenic massive sulfide deposits in the Bathurst area. In: Blackadar R G, ed. Report of activities; Geological Survey of Canada paper 75-1c, 1975. 169~173.
- 6 Carlson C A. Spatial distribution of ore deposits. *Geology*, 1991, 19(2): 111~114.
- 7 Blenkinsop T. The fractal distribution of gold deposits; two examples from the Zimbabwe Archean Craton. In: Kruhl J H

- ed. Fractal and dynamical systems in geosciences, Springer-Verlag, 1994. 247~257.
- 8 李长江, 蒋叙良, 徐有浪, 麻士华. 浙江中生代热液矿床的分形研究. 地质科学, 1996, 32(3): 264~273.
  - 9 蔡新平. 试论郑庐断裂带对胶东金矿集中区形成的巨大作用. 山东地质, 1993, (2): 93~101.
  - 10 连长云等. 中国大陆深断裂系的分形特征. 世界地质, 1995, 14(3): 34~38.
  - 11 孙启楨. 边缘成矿与边缘效应. 地学前缘, 1994, (4): 176~183.
  - 12 柳志青. 脉状钨矿床成矿预测理论. 北京: 科学出版社, 1980. 120~135页.
  - 13 Witten T A, Sander I. M. Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomenon. Phys. Rev. Lett., 1981, 47: 1400.

## Fractal Analysis of Gold Deposit Distribution in China

Ding Shijiang, Zhai Yusheng and Deng Jun

(China University of Geosciences, Beijing, 100083)

### Abstract

Based on the gold metallogenic map of China (1 : 4 000 000) combined with ore deposit investigations, spatial distribution and fractal distribution in two scale ranges of the gold deposits in China are studied and discussed. The fractal dimensions of the box-counting method are 0.3333 from 5 to 80 km and 1.3259 from 80 to 2400 km respectively; the fractal dimensions of the density method are 1.2053 from 5 to 80 km and 1.5459 from 80 to 2400 km respectively. The fractal distribution of gold deposits gives strong support to the theory about the control of the margins of convergent structures of the supercontinent circle on the gold deposit distribution and metallogeny.

**Key words:** fractal; gold deposit; China

### 作者简介

丁式江,男,1964年3月生。1988年于中国地质大学(武汉)获硕士学位。现为海南地质综合勘察院总工程师,正在中国地质大学(北京)攻读矿床学博士学位。通讯地址:100083,北京市学院路29号中国地质大学95博。

(上接第135页) 发现含有较高的铂族矿化, Pt最高可达 $56.85 \times 10^{-6}$ , 同时 Au、Ag、Bi 等也可达工业指标, 表明该隐爆角闪岩筒具有罕见的 Pt-As-Co-Au-Ag 等稀有金属、贵金属矿化。

近年来的研究表明, 大兴安岭中生代岩浆岩及其矿床的稀土元素和稳定同位素显示深源的壳幔混熔特征, 晚中生代大兴安岭区地幔隆起, 岩石圈处于伸展减薄状态。航磁  $\Delta T$  资料表明, 该区为一环形磁异常, 据推断属中生代中热级热源的活动产物。无疑, 前人大量的研究旁证了该区中生代为一地幔上涌的活动区, 本次发现的富碱富挥发分和富轻稀土的晶洞角闪岩筒, 可作为地幔流体活动的最直接证据。

铂族元素矿化一般都具镍、铬矿化, 与镁质-镁铁质超基性岩有关, 与富碱质角闪岩类有关的矿化尚未见报道过, 可能代表了在陆内伸展造山背景下的一种新的铂族等稀有金属、贵金属矿化类型。它的产出不是孤立的, 在同兴北 15 km 处还有同一类型的与角闪岩脉有关的砷-钴矿点, 表明其可能呈带状分布, 并具有较好的稀有金属、贵金属找矿前景。

黄岗-甘珠尔庙地区是一高砷的地球化学背景区, 该区的许多矿床, 如黄岗铁锡矿床, 大井锡铜多金属矿床, 大莫古吐铁铜矿等矿床中都含有大量的毒砂, 有的构成具有一定规模的独立毒砂矿体。同兴大乃林沟 As-Co-铂族矿化角闪岩筒的发现, 反映了该区地幔是富砷的, 黄岗-甘珠尔庙矿化集中区高砷背景和矿床中的高砷含量可能是该区成矿过程中壳幔相互作用的反映。

总之, 研究表明, 同兴大乃林沟晶洞角闪岩可作为研究该区幔流柱活动(地幔交代作用)和壳幔成矿作用的岩石探针, 其本身则具备良好的 As-Co-Pt 等稀有金属、贵金属成矿前景。进一步的工作正在进行中。