

成矿规律
与
矿产预测

矿床学中若干自相似现象及其意义

秦长兴 翟裕生

(中国地质大学, 北京)

摘要: 自相似性是指事物的一部分与其整体相似的性质。数学上与自相似性密切相关的是幂函数及分维(相似维)。本文从成矿作用时间演变、区域矿产分布、矿床空间分布、矿石矿物中元素和矿田构造形迹五个方面列举了矿床学中一些自相似现象;从经典地质学与现代物理学的角度分析了矿床学中自相似现象的形成机制;并指出矿床学中自相似现象的研究可为矿床成因分析提供信息,促进矿床研究的简化和定量化、提出新的研究课题、而且有利于矿床学与其它学科的渗透和综合。

关键词: 矿床 自相似性 分维

自相似性是基本数学概念之一,在集合论中有严格定义。自相似事物的一部分与其整体是相似的,是整体成比例的缩小,即它具有放大对称,但没有平移对称,或者说,它具有无穷多的层次结构,各层次间是相似的。以 Cantor 集(图 1)为例。取 $[0, 1]$ 区间,将其三等分,去掉中间的三分之一,再将剩下的两段分别三等分,并去掉中间三分之一,剩下四段……,这样无限进行下去。剩下的点称为 Cantor 集。它的三分之一放大 3 倍后与整体是相同的。如果用长度为 x 的小区间去覆盖 Cantor 集,则所需要的小区间的数目 $N(x)$ 是 x 的函数,且满足幂函数关系

$$N(x) = Ax^{-D}$$

(其中 A, D 为常数)在 $\log N(x) - \log x$ 图上,可得到一条斜率为 $-D$ 的直线,它说明 D 不随尺度 x 的变化而变化,这是自相似性重要的数学表现。上式中 D 是 Cantor 集的相似维,又称其为分维(fractal dimension)。

对图 1, $D = \log 2 / \log 3 \approx 0.63^{[10]}$ 。

在自然界,事物的层次(尺度)都有一定的限度,因此,把在一定层次(尺度)范围内各层次间相似的事物称为自相似现象。在这个范围内,事物的结构不随观察尺度的变化而变化,所以这个范围又称为无标度区^[10](Scaling zone)。

自相似现象在自然界是极其普遍的^[10],如行星表面陨石坑的分布^[11]、树和河流的形

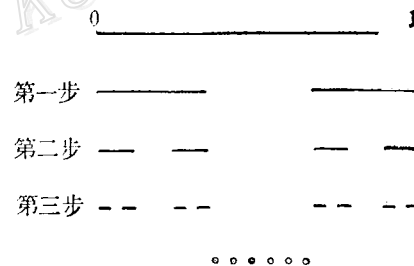


图 1 Cantor 集的生成

Fig. 1 The formation of the cantor set.

态^[10]、一些化学反应的行为^[12]等。一些人也注意到了矿床学中的自相似现象。1969年Д Б 龙德科维斯特提出了地质重演律的概念^[19]，它实际上指的是内生成矿作用的自相似性。一些学者^①^[13]从不同的角度论述了地质学中自相似现象的普遍性。D A Burrough (1981) 据一些已发表的文章中的数据计算了一些矿床的分维^[14]，这些矿床在某些方面是相似的。此外 D L Turcotte (1985) 提出了矿床储量与边界品位之间的分形模型^[15]其基本假定就是矿床储量与边界品位之间的关系是自相似的。这些研究虽然比较零散，有的只限于理论模型，但对揭示矿床学中自相似规律有重要意义。

本文试图比较系统地列举矿床学中的自相似现象，从经典地质学及现代物理学的角度分析矿床学中自相似现象的形成机制，并讨论了矿床学中自相似现象的意义。

1 矿床学中自相似性的若干表现

1.1 成矿作用的时间演变

1.1.1 中国沉积矿床的矿种演变

叶连俊 (1977) 研究表明^[1]，在整个地史时期，中国沉积矿床的形成有四个周期，且每个周期有类似的矿种组合及矿床序列，由老到新依次是 Fe-Mn-P-Al-煤-Cu-盐类。事实上，每个周期中不同矿种的比例是不同的，第一、二周期主要是以上序列的前部的矿种，第三周期比较齐全，第四周期主要是以上序列的后半部矿种，沉积矿床在整个地史时期的演化也有一个序列，早期以 Fe、Mn、P 为主，中期矿种比较齐全，晚期以 Cu、煤和盐类为主。显然，中国沉积矿床在整个地史时期及一个成矿周期内这种不同的层次有大致相同的演化趋势。

1.1.2 华南与花岗岩有关的 REE 及稀有金属矿种的演变

在整个华南地区，与燕山期花岗岩有关的 REE 及稀有金属矿床有四个成矿时期^[2]，第一期 ($134 \times 10^6 \sim 184 \times 10^6$ a，主要 $160 \times 10^6 \sim 184 \times 10^6$ a)，矿化主要是 REE、W、Nb、Ta，其次是 Be、Bi、Mo、Sn；第二期 ($121 \times 10^6 \sim 172 \times 10^6$ a)，矿化以 W、Sn、Pb、Zn 为主，其次为 Nb、Ta、Be、Bi、Mo；第三期 ($91 \times 10^6 \sim 107 \times 10^6$ a) 主要是 Sn、Cu、Pb、Zn、Sb、Hg 及少量 W。

在华南一个矿区——云南个旧矿区，矿化元素由早到晚依次是^[3]REE、Zr→Nb、Ta、Be、W、Sn→Sn、W、Bi、Mo、Cu、Zn→Pb。

对一个具体的矿床，也往往有早期 W、Sn 矿化，晚期 Cu、Pb、Zn 矿化的演化趋势^④。可见，不同层次成矿作用有类似的演化规律。

1.1.3 锡矿成因类型的演变

在整个地史时期全球范围内，锡矿成因类型的变化趋势是^⑤：锡石长石建造→锡石石英建造→锡石硫化物建造。如欧洲的锡矿形成时代较早（主要为古生代），以伟晶岩型、长石石英脉型为主^[16]。我国西南一带为燕山中晚期成矿，以石英脉型及锡石硫化物型为主，而成矿最迟的玻利维亚，则以锡石硫化物型为主^[16]。

① 秦长兴，1984，地质重演律：概念、证据、意义、问题，地质研究生，No. 2

② 秦长兴，1985，桂东北新路锡矿田矿床时空演化及成矿系列、成矿模式研究，硕士论文

③ C Φ 芦艾夫，1977，地壳发展中的锡矿化，矿床地质译文集（桂林冶金地质学院）

我国南岭地区锡矿成因类型的变化情况与上述相似, 如从滇西、桂北→赣南→个旧→大厂矿区的变化就是这样。

在一个矿田内与同一花岗岩体有关的矿床也有类似的演化趋势。如桂东北新路矿田内, 由早到晚依次是矽卡岩型矿床→石英萤石脉型矿床→锡石硫化物型矿床。

1.2 区域矿产分布

1.2.1 金属矿床的空间位置

孙启祯(1986)^[4]总结发现: 金属矿床大多分布于不同层次地质体的边缘, 如板块的边缘, 大陆的边缘、槽台的边缘、海盆的边缘及岩体的边缘, 即其空间分布是自相似的。

1.2.2 华南有色金属矿床储量的概率分布

将华南地区(云南红河以东、白草岭以南地区、贵州、广西、广东、福建、湖南、江西和浙江各省全部)某矿种的矿床的储量作为一个随机变量, 则一个具体的矿床的储量是该随机变量的一个实现。我们研究发现, 对W、Sn、Cu、Zn、Pb、Sb、Hg矿床, 储量大于t的矿床数目 $N(t)$ 在一定的储量范围内满足关系式

$$N(t) = At^{-D} \quad (\text{式中 } A、D \text{ 都是常数})$$

即t符合双曲分布(hyperbolic distribution), 这说明这些矿床的储量分布是自相似的。对Sn矿, 将计算结果列于表1。

表1 华南锡矿床储量分布的参数

Table 1. Parameters of hyperbolic distribution of reserves (tonnage) for tin deposits in South China

储量范围(吨)	维数D	系数A
< 569	0.036	212
569~27231	0.44	2640
> 27231	0.97	734528

1.3 矿化的空间分布

1.3.1 广西丹池矿带矿田、矿床及矿体的分布

丹池矿带是著名的锡矿带, 它包括三个主要矿田, 自西北向东南分别为芒场矿田、大厂矿田和芙蓉厂矿田。总体上看, 该矿带分布于北西向复式背斜与北东向褶皱的叠加部位^①。矿带中的每一个矿田又处在北东向构造叠加比较明显、北西向褶皱的隆起部位。在一个矿田内, 如大厂矿田, 矿床又主要分布在复式褶皱的组成部分——次级褶皱的轴部或近轴部, 形成三个矿区, 自东北向南西依次是大福楼矿区、拉么矿区和大厂矿区。在一个矿区内, 如大厂矿区, 矿床又分布在背斜与北东向褶皱的交汇处, 如长坡铜坑矿床、巴力矿床。在一个矿床中矿体往往在褶皱轴部集中, 如在长坡六中段和七中段可明显看出矿体集中在两个北西向褶皱的轴部。甚至在一个矿体中, 可以见到小褶曲(2 m左右尺度)轴部矿化富集, 如长坡

① 高志斌等, 1980, 广西钨锡矿床成矿规律及找矿方向的初步探讨, 锡矿地质参考资料(四)

七中段 18 号线。以上表明在一个矿带范围内不同尺度矿化空间分布的自相似性。

1.3.2 广西新路矿田矿床分带

广西新路矿田位于姑婆山花岗岩体南缘接触带，自北向南（由花岗岩体向外）依次有大冲砂卡岩型锡矿床、六合坳复合类型锡矿床、白面山似层状锡石硫化物矿床和石门脉状锡石硫化物矿床。为了计算矿田内元素的总体分带，把每个矿床的化验值分别平均，得到四个平均值分别代表四个矿床，用四个代表值中共有的元素，据克维亚特科夫斯基的方法^[5]求得整个矿田内由北向南元素的分带是 Sn、Cu→Zn→Pb。对白面山一个矿床，用同样的方法求得由下向上及由矿体内向外的分带是 Sn→Cu→Zn→Pb。可见整个矿田及矿田内一个矿床具有相似的元素分带序列。

1.4 矿石矿物中元素的分布

如在高温脉型黑钨矿矿床中，由于成矿流体中 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等离子浓度的变化，从矿化早阶段到晚阶段，黑钨矿中 Mn 含量递增，表现为 H/F（钨锰矿/钨铁矿）值的增高，如江西漂塘（图 2）、大吉山等矿床以及苏联的卡拉-奥贝矿床等^[6]。而在单个黑钨矿晶体中，从结晶始点到结晶终点 Mn 含量也递增（表 2）。这说明单个晶体中 H/F 值变化与整个矿床中不同阶段黑钨矿中 H/F 值的变化趋势是一致的，即表现出自相似性。

矿化阶段	矿化特征	样品数	MnWO ₄ (分子%)				
			10	30	50	70	90
II	(黑钨矿)-辉钼矿-绿柱石-石英脉	4					
III	绿柱石-锡石-黑钨矿-石英脉	21					
IV	锡石-黑钨矿-硫化物-黄玉-石英脉	57					
V	(黑钨矿)-硫化物-石英脉	15					

图 2 漂塘矿区各阶段黑钨矿成分分布
(据李亿斗, 1981)

Fig. 2. Frequency distribution of wolframite composition at various mineralization stages of the Piaotang deposit.

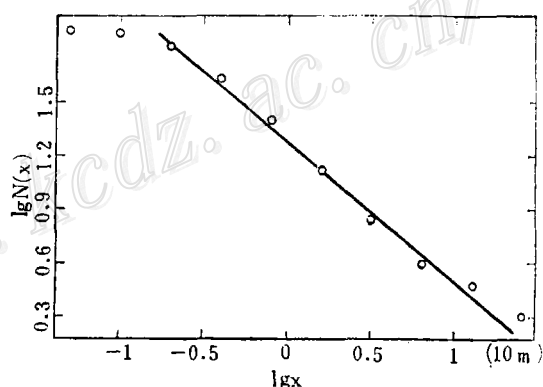


图 3 大厂铜坑矿 725 中段 0 号线矿脉
 $LgN(x)$ - Lgx 关系

Fig. 3. $lgN(x)$ versus lgx diagram of tunnel-intersected veins along No. 0 line at 725 level of the Dachang-Tongkeng deposit.

又如某地钨锡钽铌矿床中，锡石中钽铌的分布特征正好是它产出的地质体中钽铌分布的缩影^①。

1.5 矿田构造形迹

以广西大厂长坡-铜坑矿床为例。若用与矿脉走向垂直的水平坑道方向作为一个坐标轴，矿脉（含矿裂隙）位置坐标用其与坑道地板的交点（在剖面上看）来表示，则一个工程

① 陈振珍，某地钨锡钽铌矿床中锡石的研究（摘要）

表 2. 黑钨矿晶体不同部位的H/F值

Table 2. H/F ratios at different parts of wolframite crystals

矿区	西华山	漂塘	九龙脑		千亩田		卡拉-奥贝
样品	299-19	7个样品	九W42	九W6	千W1	千W2	
根部(核心)	0.387	0.97	1.12	0.81	0.87	0.81	0.78~0.89
中部(中层)	0.65)		1.24		0.98	0.86	
尾部(外层)	1.311	1.14	1.51	0.95	1.23	1.31	1.43~1.85

表 3. 长坡-铜坑矿床两工程所穿过矿脉分布的分维及相关参数

Table 3. Fractal dimensions and associated parameters of tunnel-intersected veins in the Changpo-Tongkeng cassiterite-sulfide deposit.

工程	分维 D	系数 A	尺度范围 (m)
0 号线725中段	0.72	96.7	1.4~256
0 号线685中段	0.69	24.3	6.4~205

所穿过的所有矿脉的位置坐标构成一个类 Contour 集(见前言)。我们据矿山勘探资料,用前言中的方法,计算了矿脉空间分布的分维。结果表明,在一定的尺度范围内,矿脉分布具有自相似性。其中两个工程的计算结果列于表3(图3)。可以看出,725中段在1.4~256 m的尺度范围内、685中段在6.4~205 m的范围内是自相似的。

此外我们计算表明,大厂矿田长坡-铜坑矿床中含矿裂隙密度的分布也是自相似的。

有人还发现岩石中裂隙的空间分布是自相似的^[17]。

还有许多实例,我们不一一列举。由于以往很少有人从这个角度考虑问题,因此,进一步的工作,还会发现矿床学中更多的自相似现象。

2 矿床学中自相似现象的成因探讨

自相似是事物的一种时空分布特性。具有自相似性的现象之间的差别可以如此之大。以致于我们除了说它们都具有自相似性之外,再找不到共同之处了。如树、水系和矿床。显然,自相似性是事物的一种基本特性,它的形成受某种基本规律控制。现代物理学中一些难题,如临界现象^[7]、混沌^[8]湍流都与自相似性有关,这更说明这一问题深刻的物理背景。目前这方面研究还没有大的进展。本节间接地讨论矿床学中自相似现象的形成机制。

2.1 周期性和不可逆性的统一就是自相似性

地质重演律就是地质自相似规律。我们曾论证过,①地质重演律是地质作用发展周期性和不可逆性的统一。这从经典地质学的角度给矿床学中自相似现象一个解释,同时也为矿床学中自相似现象成因的研究指出一条传统地质学的途径。如沉积矿床矿种演变的自相似性实

● 见本文第3页脚注

实际上是在沉积成矿作用总体不可逆演化的背景上周期性演化的结果。而这一背景趋势又与一个周期内的趋势是相似的。

2.2 基本地质作用及控矿因素的自相似性导致矿床特征的自相似性。

例如矿床分布受成矿期活动构造的控制,显然,后者空间分布的自相似性,在一定程度上导致前者空间分布的自相似性。又如岩浆演化往往具自相似性^[9],与花岗岩类有关的矿床因而也显示一定程度的自相似性。

2.3 基本的物理作用、化学作用、生物作用等的自相似导致地质作用及其产物的自相似性。

地质作用是物理作用、化学作用、生物作用等的综合。这些基本作用的自相似特性,可导致地质作用及其产物的自相似性。例如材料破坏时其中裂隙的分布是自相似的^[18],这可能解释岩石中断裂分布的自相似性。又如化学反应的自相似行为^{[7][12]}可部分地解释矿床矿物成份及化学成份方面的自相似性。

2.4 现代耗散结构理论、混沌理论以及其它学科中自相似现象可为矿床学中自相似现象及其机制的研究提供一些线索。

耗散系统的奇怪吸引子,处于临界点附近的物理系统都具有自相似结构^{[7][8]}。这些一般理论的研究,能促进人们对自相似现象本质的认识。其它学科中自相似现象与矿床学中类似现象的类比,也会为矿床学中自相似现象的成因研究提供信息。此外,连续相变理论中处理问题的重整化群方法,也可用于矿床学中自相似现象的研究。

3 矿床学中自相似现象的意义

3.1 是简化研究及模拟实验的依据

自相似性是事物在一定尺度范围(无标度区)内不随观察尺度变化的性质,在无标度区一部分所得到的结论可以外推到整个无标度区,而简化研究。例如,在一个矿区,如果从矿区到矿体这个层次范围是自相似的,则研究矿床分带时可先研究一个矿体,得到的结论可作为整个矿田、矿区的近似或进一步研究的指导。如果无标度区的下界已接近实验设备的尺度,则可对其进行模拟实验,并将实验结果推到整个无标度区。显然,自相似性可以作为模拟实验的依据,并据其评价实验结果的可利用程度。

3.2 提出新课题

自相似揭示了不同层次成矿作用间的相似性,这是现代矿床学综合研究中值得注意的新课题。相似性使问题简化,这有利于找到矿床学中一些具有普遍性的规律。同时,寻找并研究矿床学中的自相似现象,可加深对这些现象的认识。

3.3 有利于定量研究

对自相似现象,可用很简单的方法求出其分维。分维是复杂程度的一种量度,可作为从另一角度来描述地质体的定量指标,并用它进行深入的对比分析。例如表3中结果显示,上部的维数 D 比下部大,说明上部矿脉分布更不均匀。而系数 A 是间隔性的一种度量^[10],表3中上部的 A 比下部 A 大,说明下部矿脉更为密集,这都与野外实际情况吻合。此外,用分形几何学对矿产储量研究所得的一些关系式(如表1)可以用于成矿预测。

3.4 为成矿机制研究提供信息

这由成因分析一节很容易明白。

3.5 促进矿床学与其它学科的综合渗透

自然界已发现了很多自相似现象, 有物理的、化学的、生物的、天文的、气象的、语言的、经济的等等^[10]。有的还用了其它不同的概念来描述类似的现象, 如“重演”、“全息”等。这些现象虽然性质不同、形成机制不同, 但具有自相似性。这些现象在这个意义上的对比研究, 可促进学科的渗透与综合。如找到跨学科的规律、概念, 以及学科间概念、方法以及理论的借鉴等。

参 考 文 献

- 1 叶连俊. 沉积矿床成矿时代的地史意义. 地质科学, 1977, (3)
- 2 程裕淇等. 再论矿床的成矿系列问题——兼论中生代某些矿床的成矿系列. 地质论评, 1983, (2)
- 3 汪志芬. 关于个旧锡矿成矿作用的几个问题. 地质学报, 1983, 57(2)
- 4 孙启祯. 论边缘成矿——关于金属矿床的时空分布及其成因联系. 地质与勘探, 1986, 22(1)
- 5 E. M. 克维亚特科夫斯基. 岩石化学找矿法. 张国容、邱郁文译. 北京: 地质出版社, 1981.
- 6 李亿斗等. 黑钨矿的铁锰成分与生成条件. 钨矿地质讨论会论文集. 北京: 地质出版社, 1984.
- 7 于淦等. 相变和临界现象. 物理, 1980, 4~6
- 8 郝柏林. 分岔、混沌、奇怪吸引子和其它——关于确定论系统中的内在随机性. 物理学进展, 1983, (3)
- 9 贵阳地球化学研究所. 华南花岗岩类的地球化学. 北京: 科学出版社, 1979.
- 10 Mandelbrot B. B. The fractal geometry of nature. San Francisco: W. K. Freeman & Co., 1982.
- 11 Hartman W. K. Cratering in the solar system. Sci. Ame., 1977, 41~99
- 12 Duccord G. Fractal patterns from chemical dissolution. Nature, 1987, 325: 41~43
- 13 Rundquist D. V. Time factor in ore genesis. Global Tectonics and Metallogeny, 1984, 2: 169~182
- 14 Burrough P. A. Fractal dimension of landscapes and other environmental data. Nature, 1981, 294: 240~242
- 15 Turcotte D. L. A fractal approach to the relationship between ore grade and tonnage. Econ. Geol., 1986, 81: 1528~1532
- 16 Taylor B. G. Geology of tin deposits. Amsterdam: Elsevier, 1979
- 17 Chiles J. P. Fractal and statistical methods for modeling of a fracture network. Math. Geol., 1988, 20: 631~654
- 18 Termonia Y. Formation of fractal cracks in a kinetic fracture model. Nature, 1986, 320: 429~431
- 19 Руцквинет Д. В. Эволюция Рудообразования Во Времени. В кн: Геол. Строение СССР, 5: 303~331

SOME SELF-SIMILARITIES IN ECONOMIC GEOLOGY AND THEIR SIGNIFICANCE

Qin Changxing and Zhai Yusheng
(Chinese University of Geosciences, Beijing)

Abstract

Self-similarity is an attribute of things which means that there exists similarity between the whole and its component parts. The self-similarity is closely related to power functions and fractal dimensions in mathematics. This

paper indicates the presence of self-similarities in economic geology in such aspects as the temporal evolution of mineralization, the regional distribution of mineral deposits, the location of ore deposits, the arrangement of chemical elements in ore minerals, and the structural features of ore fields and ore deposits.

In the light of classical geology and modern physics the authors have discussed the formation mechanism of self-similarities in economic geology.

The significance of the application of self-similarity to economic geology is pointed out in this paper: it can provide information for the analysis of ore deposit genesis, lead to the simplified and quantitative study of ore deposits and advance new research subjects; what is more, it contributes to the penetration and integration of economic geology and other disciplines.

上接240页 (continued from p. 240)

ring in turbidite of Middle Triassic Banna Formation in northeastern Guangxi, with gold mainly present in pyrite, arsenopyrite, clay minerals and organic carbon. This paper makes a tentative discussion on the material source of gold and sulfur for this deposit in the light of the following aspects: ① No intrusives have been found near or beneath the orebody, so ore-forming materials seem unlikely to have been derived from igneous rocks; ② gold abundance varies only unnoticeably in Lower Permian-Middle Triassic strata, whereas the variation coefficient of gold is highest in Banna Formation, suggesting that activation and migration of metals were ready to occur in Banna Formation; ③ wall rocks contain very low gold and sulfur, which exhibit the tendency of migration from wall rocks to the orebody; ④ in the upper part of the host horizon there exists a layer of black shale which contains higher gold and organic carbon than other horizons; liquid hydrocarbon produced by organic materials in the heating process might have extracted gold from this layer or upper strata, and when hydrocarbon substances approached the orebody, gold would be released due to elevated temperature; ⑤ sulfur isotope character implies that sulfur in ores and that in regional strata are of the same source; ⑥ gold displays positive correlation with lithium in regional strata and in ores, suggesting that lithium and gold migrated synchronously from strata to orebody; ⑦ leaching experiments on auriferous siltstone of Banna Formation show that gold has strong travel capability in rocks. These arguments demonstrate that Banna Formation must have served as the major material source for this ore deposit.