

分形理论与成矿作用

张哲儒,毛华海

(中国科学院 地球化学研究所,贵州 贵阳 550002)

摘 要 总结近年来分形理论在成矿作用研究中的应用及取得的主要成果,主要表现在:矿床的空间分布具分形和多重分形性质,表明成矿作用在一定的空间范围内具标度不变性;钻孔中金属品位的频率分析表明品位的分布具分形和多重分形结构,其结构与品位高低有关,对预测深部矿体有指导意义;矿床的规模、品位的分布也具分形和多重分形结构,不同规模的矿床具有不同的分形结构,暗示不同规模的矿床具有不同的成矿地质背景和机制;元素在微观矿物表面及区域大面积的分布也具有分形和多重分形结构,其结构类型与其成因条件及机制有关。

关键词 分形,成矿作用,矿床分布,储量,品位

中图分类号: P611 X212 文献标识码: A 文章编号: 1005-2321(2000)01-0195-10

0 引言

分形理论作为非线性科学的一个分支,是研究自然界空间结构复杂性的一门学科,可从复杂的看似无序的图案中,提取出确定性、规律性的参量。既可以反演分形结构的形成机制,又可以从看似随机的演化过程(时间序列)中推测体系演化的结果,近年来倍受地球科学家的注意。在地质统计学、孔隙介质、储层非均匀性及石油勘探开发、固相表面或两相界面、岩石破裂、断层及地震和地形、地貌学等地球科学各个领域得到了广泛的应用。在矿床地球化学中 De Wijn (1951, 1953)早在 20 世纪 60 年代就提出了矿床富集的分形模型。后经多次改进,Agterberg^[1]提出了矿床的分形模型;Carlson^[2]和 Blenkinsop 等^[3]研究了矿床分布的分形性质;Turcotte^[4]系统地研究了美国的金、铜、铀和汞生产中累积矿石的总量与平均品位之间存在分形关系;Sanderson 等^[5]研究了岩芯中金品位与脉厚的关系;Chen 等^[6,7]通过分形及多重分形方法,将地球化学异常从背景中分离出来;McCaffrey 等^[8]研究了某金矿含金石英脉厚度的分形分布;Allegre 等^[9]总结了标度律与地球化学分布之间的关系;Kulik 等^[10]利用多级褶皱的分形特征勘探低品位条带状铁矿。

国内在这方面也作了很多工作,沈步明等^[11]研究了新疆某金矿品位分布分形特征;秦长兴等^[12,13]研究了矿床学中的若干自相似现象及其意义;申维^[14]发表了成矿预测的分形模型;程小久等^[15]研究了铅锌品位分维值 D 的意义;孟宪国等^[16]发表了一系列与地质数据的分形统计学有关的文章;周永章等^[17]认为微量元素在源岩中迁移的特征图案是多层次

收稿日期:1999-03-15

作者简介:张哲儒(1941—1999),男,研究员,博士生导师,地球化学动力学与动力学专业。

基金项目:国家攀登预选资助项目(95-预-25),国家自然科学基金资助项目(49873027)

陷井镶嵌分维结构,李长江等^[18,19]研究了矿床的分形性质,提出了用分形理论作为快速评价寻找超大型矿床的方法,连长云^[20]、毛华海^[21]和王祖伟^[22]等的博士论文都涉及到了矿床学中的分形的研究。

以上工作表明,元素与矿床的分布、矿床品位与储量、元素迁移、热液蚀变及矿物表面元素的分布在一定的标度区内都具分形结构,这对成矿作用理论的发展和成矿预测都有重要意义。本文就分形理论在矿床学和矿床地球化学方面应用较成功的几方面予以总结。

1 矿床空间分布的分形性质

矿床空间上的分布,在各种区域的尺度内都是不均的,具聚群形式的分布。研究点群在空间上分布的分形模型通常有两种方法,一种是数盒子法(box-counting),即将研究的区域划分成边长为 r 的正方形格子,统计含有一个或多个矿床的格子数,不断改变 r ,即可求得与 r_i 相对应的一系列的格子数(N_i), N_i 将随着 r 的增大而减少,当 r_i 和 N_i 存在指数关系时,可求出其分维值(D_b)。另一种方法是聚群密度测定法(cluster density determination),即用不同半径(r)在研究的区域内划圆圈,统计在圈内的矿床数,可得到 r_i 与 N_i 的关系,求得其分维值(D_c),也有人翻译为数圆圈法,一般认为第一种方法更敏感,较为常用。

表 1 不同地区矿床空间分布的分维值(D_b)

Table 1 Dimensionality value of spacial distribution or ore deposits in different regions

矿 床	分维值		无标度区间/km		资料来源
	D_1	D_2	δ_1	δ_2	
中国金矿(422)	0.299 3	1.307 3	20~150	150~5 000	施俊法 ^[23]
浙江金矿	0.192 3	0.710 8	1~20	20~750	李长江等 ^[18]
浙江银矿(39)	0.140 5	1.167 6			
浙江铅锌矿(56)	0.145 9	1.172 3			
浙江萤石矿(176)	0.377 8	1.185 1			
美国贵金属(4 775)	0.504 8	1.150 9	1~15	15~1 000	Carlson ^[2]
津巴布韦矿床(122)	0.32	1.12	0.3~2.5	2.5~29	Blenkinsop ^[3]
	0.28	1.18			

注:表 1 根据施俊法^[23]改造,括号中的数字为统计的矿床数

表 1 是近年来不同作者用数盒子法对不同地区矿床分布研究的结果。表 2 是本文作者对微细浸染型金矿分布进行分形研究的结果。以上研究的范围不同、地区不同、矿种不同,但都反映了一个基本事实,即矿床的空间分布在一定的尺度范围内具有自相似的分形性质,在找矿与勘查的实践中应充分注意这一事实。

表 2 微细浸染型金矿空间分布的分形特征

Table 2 Fractal characteristics of spacial distribution in slightly disseminated gold deposits

研究区域	分维值	回归线相关系数 R^2	无标度区间/km
川西北	1.54	0.993	72.7~145.3
滇黔桂	1.26	0.997	31.8~145.3
中国	1.23	0.995	18.9~66.1
西秦南亚带	0.98	0.983	23.9~107.5
美国卡林成矿带	0.77	0.999	2.2~29.3

上述结果有两种情况:一种情况是在大范围内研究一个矿种的分布,分成两个不同的无标度区,每个无标度区内,矿床的分布具有不同的分形结构,另一种情况是在一个大范围内矿床的分布只有一个无标度区。Agterberg 等^[1]研究加拿大 Abitibi 火山岩带在 8.96 ×

10^4 km^2 范围内 1 306 个金矿床的分布时, 确定其分布具分形结构, 其分维值为 $D_c = 1.54$ (聚群密度测定法), 然后在这个大范围内, 取一个小的区域 ($4\ 185 \text{ km}^2$, 含有 295 个矿床), 接着再把这个小区域分成两个面积相等的区域, 一个含有 222 个矿, 另一个含有 73 个矿, 结果在各个层次上都具有一个无标度区, 而且都有相似的分形结构和相近的分维值。

矿床在空间上的分布受地质背景和成矿机制的制约, Carlsson^[2]认为在热液系统中, 若干循环单元活动于具有分形结构的裂隙系统中, 这些单元又由若干更小的单元组成, 依次构成了不同等级的循环单元, 矿床形成于某些等级的循环单元内, 从而构成了分形系统, 并出现了两个无标度区, 热液和裂隙系统在 $1 \sim 15 \text{ km}$ 无标度区表现出来, 而 $15 \sim 1\ 000 \text{ km}$ 范围是侵入体的分形聚集的结果, Blenkinsop^[3]把他对津巴布韦金矿分布研究获得的两无标度区都归因于破碎带内分形热液系统内矿化的结果。

本文作者研究的微细浸染型金矿在不同尺度下的分布只具有一个无标区, 这可能与研究对象为单一类型有关。

2 钻孔中金属品位分布的分形结构

将钻孔中品位(质量分数)大于某个值(C_i)的数目 N_C 对 C_i 作双对数图, 若存在直线关系, 则表明存在分形关系

$$N_C = A \cdot C_i^{-D} \quad (1)$$

D 为双对数图中直线的斜率, 为分维值。

Sanderson 等^[5]研究了西班牙 La Codocera 金矿钻孔金品位的分布, 图 1 是两个钻孔的情况, 28 号孔中, 所有样品中 Au 的质量分数都小于 0.01×10^{-6} , 在 27 号钻孔中有一部分孔段含 Au 量比较高。在 27 号钻孔中 70 个孔段的 Au 的质量分数大于 0.01×10^{-6} , $D = 0.45$, 8 个孔段超过 1×10^{-6} 。28 号孔 Au 的质量分数都小于 1×10^{-6} , $D = 0.7$ 。

本文作者认为, 在 27 号孔, Au 的质量分数大于 1×10^{-6} 的部分明显偏离了 $D = 0.45$ 的直线, 如果单独把这一部分拟合, 显然 D 值要大, 反映了在该区 Au 的质量分数小于 1×10^{-6} 与大于 1×10^{-6} 可能由于不同的机制或不同的次期形成的。以上讨论可看出, D 值是金含量分布不均的标志之一, 也是金品位高低的指标。

Sanderson^[5]等还研究了该区含金石英脉的品位与矿脉密度的关系, 结果显示, 低品位矿脉具简单的分形结构, 并具有较高的分维值, 高含量的矿脉偏离简单的分形结构关系(具多重分形结构), 并具有较低的分维值, 这种关系对预测深部矿脉有指导意义。

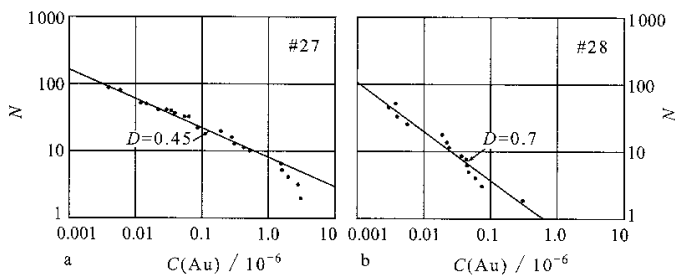


图 1 La Codocera 地区钻孔金含量与孔段数目的双对数图

(据 Sanderson^[5])

Fig.1 Log-log plot of gold content in borehole and number of hole-segment in La Codocera district

本文作者利用贵州紫木函金矿 205 个钻孔的金平均品位^① 计算了品位与频度的关系, 结果见图 2a。图 2a 中矿体平均品位 $C(Au)$ 的对数值与累积钻孔数 N 的对数值在 $\lg C(Au) = 0.477 \sim 1.176$ 范围内存在很好的线性关系 ($R^2 = 0.97$), 表明平均品位 $C(Au) = 3 \sim 15 \text{ g/t}$ 的无标度区范围内, 金品位具有分形特征, 分形维数为 2.97。在 205 个钻孔中, 平均品位从 $0.36 \sim 35.56 \text{ g/t}$ 之间变化, 这样把平均品位分成了 3 个区段, 即 $0.36 \sim 3 \text{ g/t}$, $3 \sim 15 \text{ g/t}$ 和 $15 \sim 35.56 \text{ g/t}$ 。这 3 个区域品位的分布具有不同的分形特征, 这暗示了成矿作用的多期性, 早期的矿化形成了低品位矿石, 主矿化阶段形成大量的工业矿石, 晚期(包括现代的

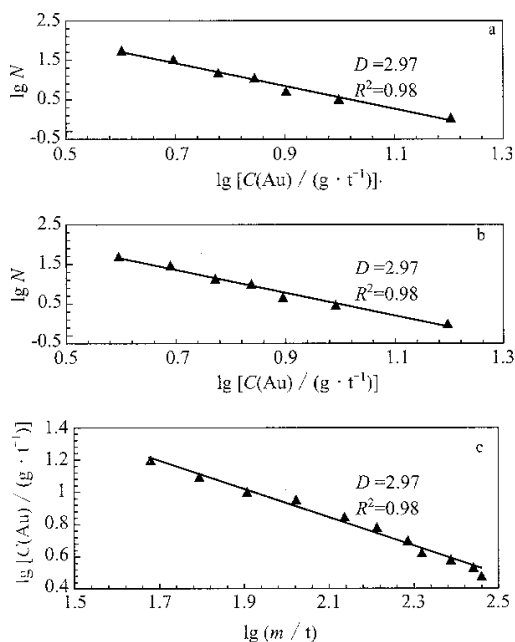


图 2 金矿床品位-频度及品位-储量分形

Fig. 2 Fractal of tenor-frequency and tenor-reserve in gold deposits

a—紫木函金矿钻孔平均品位-频度分形; b—中国微细浸染型金矿床品位-频度分形; c—中国微细浸染型金矿品位-储量分形

等^[15]研究了凡口铅锌矿锌品位的分形结构, 认为在一定程度上 D 值能为解决矿床地质问题及矿床勘查评价提供某些定量信息, 控矿及矿空隙特征是影响品位分形值的主要因素。

3 矿床储量-品位的分形结构

许多作者从多种角度研究了矿床的规模(储量)及储量-品位的分形结构, 使用的方法基本上都基于 Turcotte^[4]的、由矿床富集的分形模型导出的公式

$$C/C_0 = (m_0/m)^{D/3} \quad (2)$$

$$N/N_0 = (m/m_0)^{D/3} \quad (3)$$

① 郭振春. 贵州省兴仁且紫木函矿区紫木函段勘探地质报告. 贵州省地质矿产局 105 地质大队, 1993

式(2)为矿床储量与品位 的分形关系式, m_0 和 C_0 为能与成矿作用原始地层或矿源层的总质量和平均品位, m 和 C 为矿床的储量和品位。式(3)为矿床储量与矿床数目的分形关系, N_0 是具有某一确定储量 m_0 的矿床的数目, N 是储量大于 m_0 的矿床的数目。

连长云^[20]对世界上 153 个斑岩铜矿床, 国外 140 火山岩型铅锌矿床, 中国 875 个岩金矿床和世界 1 164 个岩金矿床的频率-吨位的分布研究(图 3)表明, 矿床规模的分布不是连续的, 而是存在着拐点。表明规模不同的矿床分属于不同的总体。李长江等^[18]研究了我国浙江省萤石、金、银和铅锌矿床和中国萤石矿床的频度-储量分布(图 4)表明是一个连续的分布, 并认为在相当大的范围内, 矿床的储量分布具有标度不变性, 即分形分布, 并且不同矿床的储量分布的分维数变化不大, 表明它们可能有类似的矿化富集机理。Hodgson 等^[24]对全球中温深成热液金矿床规模分布研究表明, 这些矿床分布在吨位-累积百分比图解上并不呈一条直线, 而是呈 S 型, 表明不同规模的金矿床并不属于同一总体。

以上情况表明, 由于统计的范围和矿床类型不同, 矿床的规模分布具有简单分形分布和多重分形分布两种形态, 这意味着不同规模的矿床(尽管有些是同一类型的矿床, 如斑岩型铜矿)有着不同的成矿地质背景和不同的成矿因素, 这一认识对于理解超大型矿床的形成及对超大型矿床的预测有重要意义。

秦长兴等^[13]对华南有色金属矿产储量和品位 的分形模型研究, 指出了其理论意义及其在矿产资源预测评价中的作用。Turcotte^[4]总结了美国汞、铜、金和铀生产中累积的矿石总量(M)和产物品位(C)的关系(图 5), 这些结果表明, 导致汞、铜、金和铀成矿的过程是标度不变的, 由此他们计算了形成这些矿床源区的性质, 对于汞, 假定源区的丰度 $C_0 = 8 \times 10^{-8}$ (C_0 为质量分数, 下同), 形成这么多矿床源区的质量 $M_0 = 4.05 \times 10^{17}$ kg, 约占美国地壳体积的 0.05%, 表明汞矿产的富集过程只发生在地壳体积的较小的一部分。对于金, $C_0 = 3 \times 10^{-9}$, $M_0 = 3 \times 10^{18}$ kg, 占美国地壳体积的 0.4%, 对于铜, $C_0 = 2.5 \times 10^{-5}$, $M_0 = 3.22 \times 10^{19}$ kg, 约占美国地壳体积的 4%, 因此形成铜矿床富集过程涉及的地壳的体积, 比汞富集的地壳体积大 100 倍。对于铀, $C_0 = 1.25 \times 10^{-6}$, $M_0 = 6.4 \times 10^{17}$ kg, 约占美国地壳体积的 0.09%。

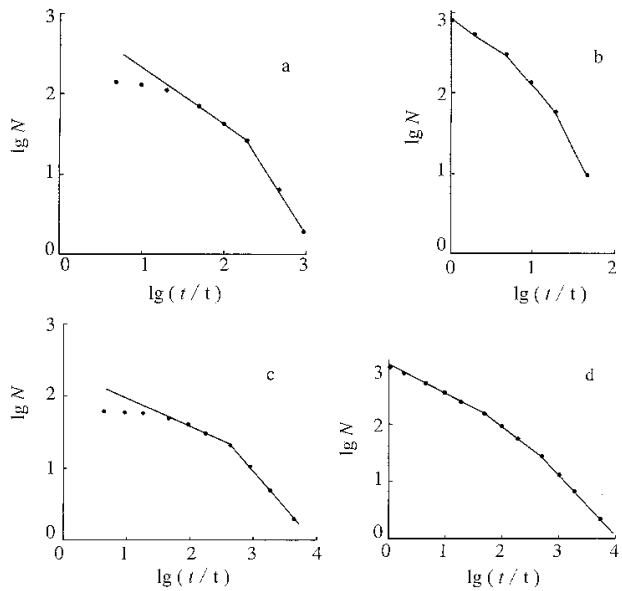


图 3 国内外各类矿床频数-吨位分布
(引自连长云^[20])

Fig.3 Frequency-tonnage distribution of various types of deposits at home and abroad
a—国外火山岩型铅锌矿床频数-吨位分布, b—中国岩金矿床频率-吨位分布, c—世界斑岩铜矿床频数-吨位分布; d—世界岩金矿床频度-吨位分布

4 矿物表面元素分布的分形结构

自然界矿物晶体内元素的分布是无序的和不均匀的(尤其是次要组分),这是一个非常普遍的现象,对这种现象的理论研究相对较少,Block 等^[25]用电子扫描显微镜和能量散射 X

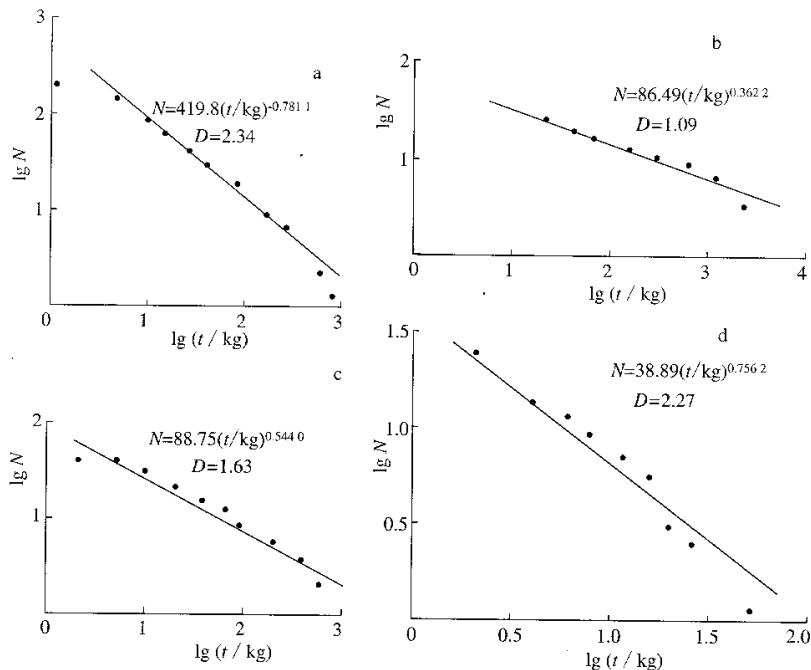


图4 浙江矿床数(N)与储量(t)的关系

(据李长江等^[19])

Fig.4 Relationship between number of deposits(N) and reserve(t) in Zhejiang Province

a—萤石(储量 $t > 10^7$ kg) b—金(储量 $t > 1$ kg) c—银(储量 $t > 10^3$ kg);

d—铅锌(储量 $t > 10^7$ kg)

射线谱仪扫描图象对沉积结构中元素的微观分布进行了多重分形分析。

本文作者利用王奎仁等^[26]对金牙、拉尔玛和东北寨3个微细浸染状金矿床矿物的元素分布质子探针扫描图象,在微观尺度上对Au、S、Fe和Si在矿物表面分布进行了分形研究。使用了Lieca Cambridge公司的专用图像分析软件,对上述图像进行分析,获得一系列元素含量等值线图的周长和面积值。将这些值投影到以面积和周长为坐标的双对数坐标图上。求得各图像分维值 D_{a1} 的值见表3。

本文研究的3个矿区元素在矿物表面分布的分维值依次为: D_a (东北寨) $< D_a$ (金牙) $< D_a$ (拉尔玛)。热液成因矿物和矿石中元素分布的 D_{a1} 值普遍高于沉积成因的草莓状黄铁矿(F611)的 D_{a1} 值,同一矿床中,不同矿物的平均 D_{a1} 值有一定的差别,同一矿物中各元素的 D_{a1} 值很相近,体现了矿物形成条件对元素分布形态的控制作用。

元素在矿物表面的分布与矿物的生长及该元素的沉降过程有关,这些过程的动力学行为与温度密切相关。一般情况下,温度高时矿物生长速度快,该组分在矿物中的分布也就越不均匀。东北寨矿床的成矿温度为 $150 \sim 180^\circ\text{C}$,金牙矿床为 $155 \sim 244^\circ\text{C}$,拉尔玛矿床为

202~290 ℃ 3 个矿床成矿温度的顺序为 $t_{\text{东北寨}} < t_{\text{金牙}} < t_{\text{拉尔玛}}$ 。这一顺序与前面获得的各矿床平均的 D_{a1} 顺序是一致的。同一矿床中不同的成矿阶段形成的矿物中元素的分布具有不同的 D_{a1} 值。黄铁矿及相应的矿石一般是在成矿主期形成的 相对于整个成矿阶段 ,成矿

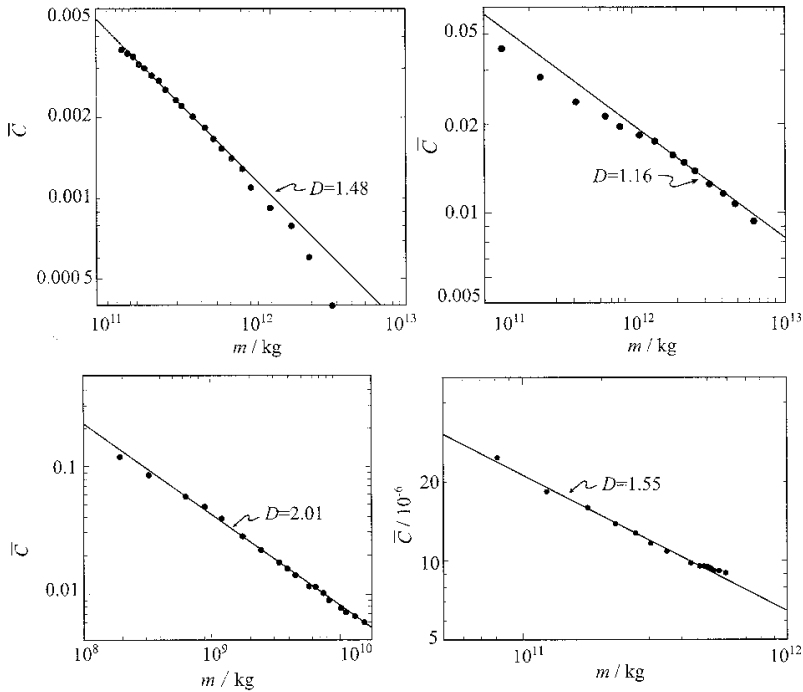


图 5 美国汞、铜、金和铀累积矿石量(m)与平均品位(\bar{C})的双对数图
Log-log plot of accumulative quantity(m)and average tenor(\bar{C}) of Hg ,Cu ,Au and U in U.S.A.

温度较高 ,雄黄一般是成矿晚期的产物 ,成矿温度较低 ,因而雄黄中各元素分布的 D_{a1} 值(例如东北寨矿区的 F76 样品 ,金牙矿区 F412 样品)要比黄铁矿(如 F72 和 F44、F46 样品)小 ,

表 3 矿物表面元素分布周长-面积分形

Table 3 Distributional perimeter area fractal of elements on mineral surface

样 号	元素的 D_{a1} 值					矿石、矿物	矿床
	Au	As	S	Fe	Si		
F44	—	1.51	1.47	1.53	1.36	1 号矿体黄铁矿质矿石	金 牙
F46	1.48	1.46	1.40	1.38	—	3 号矿体中的黄铁矿	
F47	—	1.25	1.27	1.29	—	3 号矿体中的黄铁矿	
F49	1.43	1.48	1.54	1.52	1.49	10 号矿体黄铁矿质矿石	
F410	—	1.52	1.55	1.53	1.50	10 号矿体黄铁矿质矿石	
F412	—	1.15	1.15	1.17	—	10 号矿体中的雄黄	
F68	—	1.60	—	1.57	1.53	含矿硅岩	拉 尔 玛
F69	—	1.56	—	1.54	—	含辉锑矿矿化硅岩	
F611	1.13	1.28	1.31	—	1.30	草莓状黄铁矿	
F72	1.25	1.24	1.14	1.18	1.16	黄铁矿质矿石中的黄铁矿	东 北 寨
F76	1.16	1.22	1.12	1.15	—	黄铁矿质矿石中的雄黄	

拉尔玛金矿床主矿化阶段形成的热液蚀变岩——硅岩石英细网的形成温度为 212~

370 ℃ 次要矿化阶段形成的热液蚀变岩——含辉锑矿及石英地开石的重晶石细脉的形成温度为 163~240 ℃, 表现在含矿硅岩(F68)的 D_{a1} 值要大于含辉锑矿矿化硅岩(F69)。沉积成因的草莓状黄铁矿(F611)的形成温度要比与成矿作用有关的热液成因黄铁矿形成温度低, 其 D_{a1} 值也相应较小。

同一矿床中, 在比较高温度条件下形成的矿物含金量比在较低温度下形成的同类矿物要高, 由此可看出, 同一矿床中, D_{a1} 值大的载金矿物含金量也较高, 这一点在金牙矿床中各黄铁矿的 D_{a1} 值和含金量的关系中得到初步验证。同一矿物中各元素的 D_{a1} 值基本一致, 从而体现了矿物成因条件对 D_{a1} 值的总体控制作用。

Au, As, S, Fe, Si 等元素在微细浸染型金矿床黄铁矿等矿物及矿物表面的分布具有分形结构, 分维值 D_{a1} 的大小反映了成矿条件的制约作用, D_{a1} 值的大小受成矿温度的控制。产

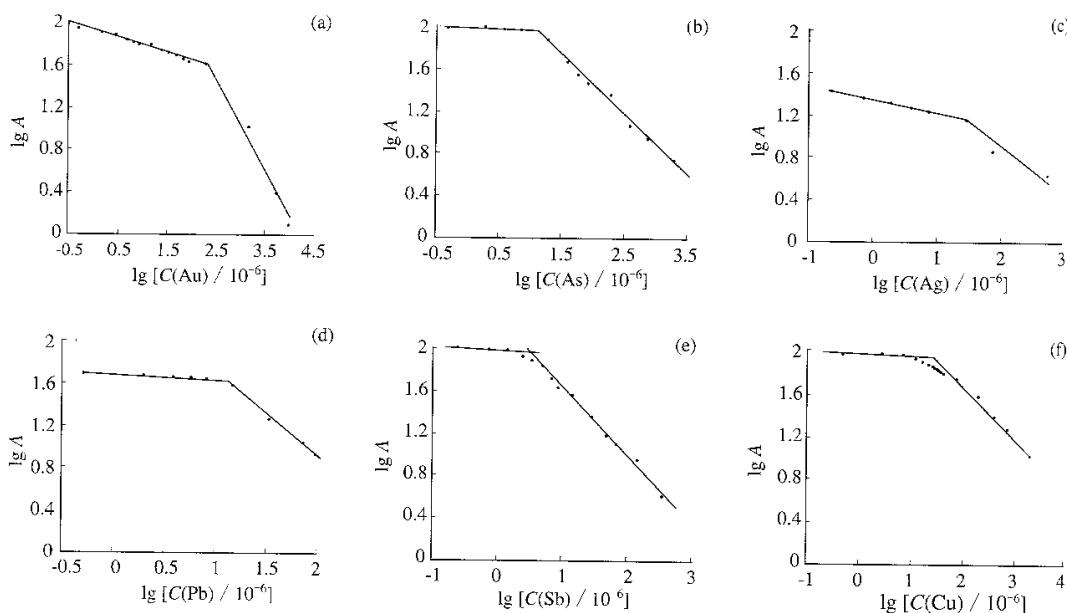


图 6 不同元素分布的等值线圈定的面积(A)与元素浓度(C)的双对数图

Fig.6 Log-log plot of area (A) enclosed by distributional contour line of different elements and element concentration (C)

于成矿温度较高矿区的矿物具有较高的 D_{a1} 值, 同一矿床, 不同成因的矿物和不同成矿阶段的矿物具有不同的 D_{a1} 值, 同一矿物中不同元素的 D_{a1} 基本一致。因此 D_{a1} 值可作为研究元素在矿物表面分布形态的一种定量化指标。

5 元素分布的分形结构

陈秋明(Chen Qiuming)等^[7]对 Mitchell-Sulphurdts 地区(1 233 个样品取得的数据), Au, Cu, As, Ag, Sb, Pb, K_2O 和 SiO_2 的分布进行了重色分形研究, 使用的是由元素等值线建立的元素浓度-面积和周长-面积分形模型(图 6), 由图 5 又看出, Au, Ag, Sb, As, Pb 和 Cu 的

元素浓度-面积存在着多重分形结构,本底和异常有明显的拐点,用这种方法可以把本底和地球化学异常很好的分离开来。结合当地的地质情况,这些异常与硫化物矿物蚀变和硅化能很好地吻合,而且由斜率(代表了分维值的大小)可看出,金的分布比铜更没有规律,这一结果也暗示不同机制形成的元素在自然界的分布有不同的分形结构,这将为研究元素在自然界的分布及富集成异常和矿床提供一个有力的工具。

综上所述,分形理论已用于矿床多方面的研究,从一个新的角度研究矿床的分布及元素的分布与富集的规律,这不仅对理解矿床的形成(形成条件、地质背景和机制等)有重要意义,而且为矿床的预测及勘探提供一个新的有力工具,由于这一领域的研究仍处于发展阶段,目前还不成熟,在矿床与元素的分形结构与形成这些结构的机制之间及与对矿床的预测之间还有一定的距离,这是我们要努力的方向。

参考文献:

- [1] Agterberg F P, Qiuning C, Wright D F. Fractal modelling of mineral deposit [A]. *International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industries* [C]. Canada, Montreal: Canadian Institute of Mining Metallurgy and Petroleum, 1993. 43~53.
- [2] Carlson C A. Spatial distribution of ore deposit [J]. *Geology*, 1991, 19(2): 107~110.
- [3] Blenkinsop T. The fractal distribution of gold deposit: two examples from the Zimbabwe Archaen Crator [A]. Barton C C. *Fractal in Petroleum Geology and Earth Processes* [M]. New York and London: Plenum Press, 1994. 247~258.
- [4] Turcotte D L. *Fractals and Chaos in Geophysics* [M]. 2nd ed. Cambridge UK: Cambridge University Press, 1996. 81~99.
- [5] Sanderson D J, Roberts S A. Fractal relationship between vein thickness and gold grade in drill core from La Codosera Spair [J]. *Economic Geology*, 1994, 89: 168~173.
- [6] Qiuning C, Agterberg F P, Ballantyne S B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal method [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1994, 51: 109~130.
- [7] Qiuning C, Agterberg F P, Bonham-Carter G F. A spatial analysis method for geochemical anomaly separation [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1996, 56: 183~195.
- [8] Mcaffrey K J W, Johnston J D. Fractal analysis of a mineralized vein deposit: Carraghinalt gold deposit, County Tyrone [J]. *Mineralium Deposita*, 1996, 31: 52~58.
- [9] Allege C J. Scaling laws and geochemistry distribution [J]. *EPSL*, 1995, 132(1~4): 1~13.
- [10] Kulik D A, Chernovsky M I. Fractal properties of multi-order folding as a tool for exploration of Low-grade banded iron ores in the kirivoy Rog Basin (Ukraine) [J]. *Geologiskhe Rundschau*, 1996, 85(10): 3~11.
- [11] 沈步明, 沈远超. 新疆某金矿的分维特征及其地质意义 [J]. 中国科学(B辑), 1993, 23(3): 297~302.
- [12] 秦长兴. 矿床学中若干问题的分形几何学研究 [D]. 武汉: 中国地质大学档案馆, 1989.
- [13] 秦长兴, 翟裕生. 矿床学中若干自相似性现象及其意义 [J]. 矿床地质, 1992, 11(3): 259~265.
- [14] 申维. 成矿预测中分形模型分维数估计的新方法 [J]. 长春地质学院学报, 1997, 1: 58~70.
- [15] 程小久, 卢建杭, 宋亮明. 铅锌品位分维 D 值的意义和计算程序 [J]. 地质与勘探, 1994, 30(5): 32~35.
- [16] 孟宪国, 赵鹏大. 论地质现象中的分形统计学 [J]. 地球科学, 1996, 22(1): 601~603.
- [17] 周永章, Edward H G, Guha J. 地质热场中微量元素迁移的方向性和分维结构图象 [J]. 中国科学(B辑), 1994, 24(12): 1308~1313.
- [18] 李长江, 蒋叙良, 徐有浪, 等. 浙江中生代热液矿床的分形研究 [J]. 地质科学, 1996, 31(3): 264~273.
- [19] 李长江. 快速逼近潜在超大型矿床的新理论和新方法 [J]. 矿床地质, 1998, 17(增刊): 853~860.

- [20] 连长云 . 大兴安岭西坡地区与超大型矿床有关的非线性研究 [D]. 长春 : 长春科技大学 , 1997. 4~8.
- [21] 毛海 . 微细浸染型金矿床地球化学、热力学、动力学及分形研究 [D]. 贵阳 : 中国科学院地球化学研究所教育处 , 1997.
- [22] 王祖伟 . 蚀变构造型金矿床地质地球化学及资源潜力 [D]. 贵阳 : 中国科学院广州地球化学研究所教育处 , 1998.
- [23] 施俊法 . 分形理论与矿产资源定量预测研究 [J]. 国外地质科技 , 1998, 2 : 62~70.
- [24] Hodgson C J , Love D A. Giant mesothermal gold deposits : descriptive characteristics , genetic model and exploration area selection criteria [A]. *SEG SP-2 Giant Ore Deposits* [M]. [s. l.] [s. n.], 1993. 157~211.
- [25] Block A , Von-Bloh W , Klenke T , et al. Multifractal analysis of the microdistribution of elements in sedimentary structure using images from scanning electron microscopy and energy dispersive X ray spectrometry [J]. *Journal of Geophysical Research , B , Solid Earth and Planets* , 1991, 96(10) : 16223~16230.
- [26] 王奎仁 , 周有勤 , 孙立广 , 等 . 中国几个卡林型金矿床金赋存状态研究 [M]. 合肥 : 中国科技大学出版社 , 1994. 105~114.

FRACTAL THEORY AND ORE-FORMING

ZHANG Zhe-ru¹ , MAO Hua-hai

(*Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*)

Abstract: Application of fractal to ore-forming and its results in recent years are summed as follows: Spatial distribution of ore deposits is a fractal and multifractal structure indicating that ore-forming process follows the scale invariance law in certain scope. Grade-frequency fractal and multifractal is confirmed according to the distribution characters of metal grade in drills. The fractal structure is concerned in the value of grade that may calculate the ore bodies at depth. Frequency-size and size-grade distribution are also characterized by fractal and multifractal structure suggesting that ore deposits with different size are of different geological background and ore-forming mechanism. The fractal of distribution of elements both on micro-surface of minerals and on microscope is confirmed and the fractal structure are related to the conditions and mechanism of formation.

Key words: fractal; ore-forming; distribution of ore deposits; reserve; grade