

文章编号: 0258-7106 (2000) 03-0281-08

浙江萤石矿床的空间分布

麻士华 朱兴盛 李长江

(浙江省地质矿产研究所, 杭州 310007)

提 要: 本文应用单元递归法和分形丛集分析方法对浙江 3 个不同区域范围内 629 个萤石矿床(点)的空间及储量数据进行统计分析, 揭示了这些矿床在空间上遵循分形丛集分布, 在 0.5~15 km 尺度内具有较一致的分维数, 分别为 0.539、0.552 和 0.405, 表明这些矿床尽管成矿地质环境及赋矿岩性不尽相同, 但可能有着同一的成因机制; 萤石矿床丛集分布形成的密集区的空间尺度为 250 km² 左右。在矿产勘查中可以依据这一尺度来制定既经济又不致于漏掉重要矿床密集区的最佳勘查网度, 以达到快速逼近潜在矿床密集区的目的。

关键词: 萤石矿床 单元递归法和分形丛集分析 矿床密集区空间尺度

中图法分类号: P619.21+5

文献标识码: A

1 引言

人们早已认识到, 地壳中矿化分布的不均匀性是一种普遍现象, 但是如何定量描述这种不均匀性, 它的严格的统计学证据是什么? 许多矿床往往丛集分布, 形成具有重要经济价值的矿化密集区, 又怎样从统计学的意义上揭示和表征矿化密集区的空间尺度? 这些都是长期没有解决的问题。Mandelbrot (1982)^[13]创立的分形理论为研究这一问题开拓了新的途径。许多作者用分形来描述矿化的时空分布, 以分维数定量表征矿化分布不均匀的程度, 通过对大量实际已知的矿床分布数据的分形统计分析, 已揭示了一些隐含在不均匀性和复杂性之中的规律^[2~6, 10, 11]。这些新的规律将对找矿勘查工作产生深远的重大影响。本文在前人研究的基础上, 以浙江萤石矿床为例, 应用单元递归法和分形丛集分析方法对上述问题作了进一步的研究。

2 成矿地质背景及矿床地质特征概述

浙江是环太平洋矿带最著名的萤石成矿区之一, 萤石矿床分布概况如图 1 所示。全区已知萤石矿床(点)达 629 处, 主要为石英-萤石建造的脉状矿床, 按矿床与岩浆岩产状的空间关系主要分为两种类型: ①产于中生代火山岩区的; ②产于燕山期花岗岩区的。然而, 已有

基金项目: 国土资源部青年地质学家基金资助研究(项目编号 97/9811)的部分内容

第一作者简介: 麻士华(1968-), 男, 高级工程师, 1989年毕业于中国地质大学(武汉)计算机专业, 主要从事计算机应用与矿产地质研究

收稿日期: 1999-12-27; 修订日期: 2000-04-24

的研究表明, 上述两类萤石矿床尽管在产出的地质环境和赋矿岩石性质等方面存在差异, 但是从大的构造背景看, 它们的形成均与晚白垩纪时期太平洋板块向中国东部大陆俯冲松弛期的引张构造环境有关, 并且由萤石和方解石裂变径迹等时线法及矿物-蚀变围岩的 Rb-Sr、K-Ar 等时线法获得的萤石成矿年龄为 $70 \times 10^6 \sim 90 \times 10^6$ a 左右, 比赋矿岩浆岩的成岩年龄滞后 $40 \times 10^6 \sim 70 \times 10^6$ a, 成矿流体是大气降水成因的地热水, 表明了两类萤石矿床的成矿作用在本质上的一致性^[7-9,12]。表 1 给出了浙江一些主要萤石矿床地质特征。

表 1 浙江省主要萤石矿床地质特征简表

Table 1. Geological characteristics of main fluorite deposits in Zhejiang Province

矿床名称	构造背景		赋矿围岩	围岩蚀变	控矿构造	矿石类型	成因机制	规模
庚村	浙	莫干山块断隆起	花岗岩、花岗闪长岩 (γ_3^f 、 γ_3^s)、火山岩 (J_3l)、沉积岩 (O_3y)	主要有绢云母化、硅化、高岭土化、黄铁矿化和绿泥石化等, 蚀变带宽度 $n \sim 20$ m (个别 > 20 m)	岩体接触带断裂, 走向主要为 NW、NE、近 EW	以石英萤石型、萤石型为主, 萤石石英型次之, 局部有银钼石萤石型、重晶石萤石型 (庚村) 等	晚白垩世地热水浅循环淋滤成矿	大型
新桥芦塘	西	顺溪复背斜南东翼, 次级背斜轴部	花岗岩 ($\gamma_3^f \sim \gamma_3^s$)、(岩体侵入于 $\epsilon \sim o$ 地层中)					大型中型
泗岭笔架尖	拗陷	河桥向斜轴部	花岗岩 ($\gamma_3^f \sim \gamma_3^s$)、(岩体侵入于 $\epsilon \sim o$ 及 J_3h 地层中)					小型矿点
华溪		英蓉山块断隆起	变质岩 ($An\epsilon$)	主要有硅化、绢云母化、高岭土化, 其次为绿泥石化、黄铁矿化	隆起边缘次级构造	石英萤石型和萤石型为主, 其次为萤石石英型		中型
八都		龙泉-八宝山块断隆起	变质岩 ($An\epsilon$)、花岗闪长岩 (γ_3^s)		岩体接触带断裂, 主要为 NW 向			大型
南山坑		南岸块断隆起	火山岩 (J_3g)	以硅化为主, 其次有高岭土化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化, 局部有冰长石化 (后树)、黄铁矿化 (后树南山坑、毫石)、重晶石化 (佐村) 等。蚀变带宽度 $0. n \sim 10$ m (个别 20 m)	隆起边缘次级构造控盆断裂及次级构造, 主要为 NE 向	主要为萤石型、石英萤石型, 其次为萤石石英型、方解石萤石型, 局部出现冰长石萤石型、黄铁矿萤石型 (后树) 及重晶石萤石型 (佐村)、硫化物萤石型 (毫石) 等	晚白垩世地热水浅循环淋滤成矿	中型
三溪佐村	浙	嵊县断陷盆地边缘	火山岩 ($J_3g \sim J_3x$) 沉积岩 (Kc)					大型
杨家余山头	中	武义断陷盆地边缘	火山岩 (J_3x)		控盆断裂及次级构造			大型
茭塘塘头	起	武义断陷盆地	沉积岩、火山沉积岩 (K_{1c}) 沉积岩 (K_{1c} 、 K_{1f})					中型
后树		武义断陷盆地	火山岩 (J_3x , J_3g) 次火山岩		控盆断裂			矿点
湖山		湖山断陷盆地	火山岩、火山沉积岩 (K_{1c} 、 K_{1g})		控盆断裂及次级构造			大型
枫林		永康断陷盆地边缘	火山岩 (J_3x)		控盆断裂及次级构造			大型

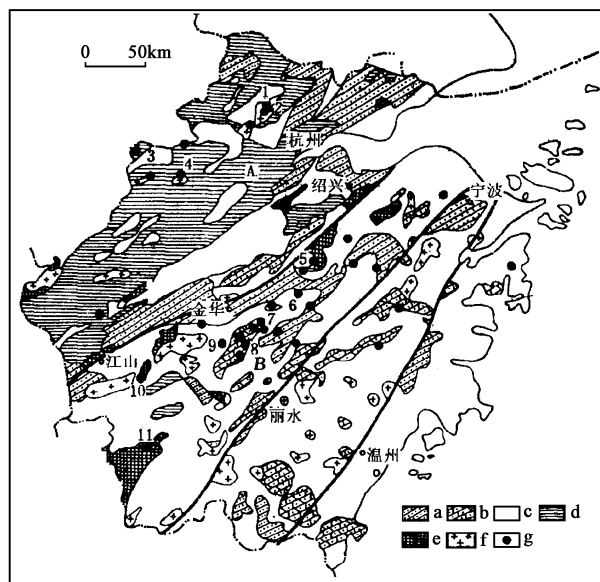


图1 浙江省萤石矿床分布略图

a—白垩系沉积盆地; b—白垩系火山-沉积盆地; c—上侏罗统火山岩; d—古生代沉积岩; e—前寒武系变质岩;
f—岩浆岩; g—萤石矿床; A—浙西拗陷; B—浙中隆起

Fig. 1. Diagrammatic geological map of Zhejiang Province, showing distribution of fluorite deposits.

a—Cretaceous sedimentary basin; b—Cretaceous volcanic-sedimentary basin; c—Upper Jurassic volcanic rocks;
d—Paleozoic sedimentary rocks; e—Precambrian metamorphic rocks; f—Magmatic rocks; g—Fluorite deposit;

A—West Zhejiang depression; B—Central Zhejiang upwarping.

3 成矿强度指数

浙江的萤石矿化在空间上呈不均匀分布, 在江山-绍兴与丽水-宁波两条深断裂之间的浙中隆起带长约 360 km, 宽 194 km 左右, 分布有 552 个萤石矿床 (点), 占浙江已知萤石矿床 (点) 数量与储量的 80% 以上。下面我们进一步考察这个区域内萤石矿化的分布情况。如果将这个区域作为 0 级单元, 并把它划分为 4 个相等大小的 1 级单元, 每个 1 级单元面积为 $180 \times 97 \text{ km}^2$ 。然后, 再将每个 1 级单元划分为 4 个相等大小的 2 级单元, 共有 16 个 2 级单元, 每个 2 级单元面积为 $90 \times 48.5 \text{ km}^2$, 如此操作, 不断划分下去。

把一个单元内的矿床 (点) 数目 (或储量) 与包含它的上一级较大单元的矿床 (点) 数目 (储量) 之比称为成矿强度指数, 记为 P 。例如, 对于 1 级单元, 其包含的矿床 (点) 数目分别为 n_1, n_2, n_3, n_4 , 则这 4 个 1 级单元的成矿强度指数 P_1, P_2, P_3, P_4 分别为

$$\begin{aligned} P_1 &= n_1 / (n_1 + n_2 + n_3 + n_4) & P_2 &= n_2 / (n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \\ P_3 &= n_3 / (n_1 + n_2 + n_3 + n_4) & P_4 &= n_4 / (n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \end{aligned} \quad (1)$$

上述求成矿强度指数的方法在数学上称为递归 (此方法引自陈颢和陈凌, 1998)^[1]。把 P_1, P_2, P_3, P_4 按从高到低的顺序排列, 标绘在图上, 在图 2 和图 3 中分别给出了对萤石矿床点数和储量的 4 个层次的计算结果。从该两幅图可以看出, 在 4 个不同级别的单元中, 无论矿

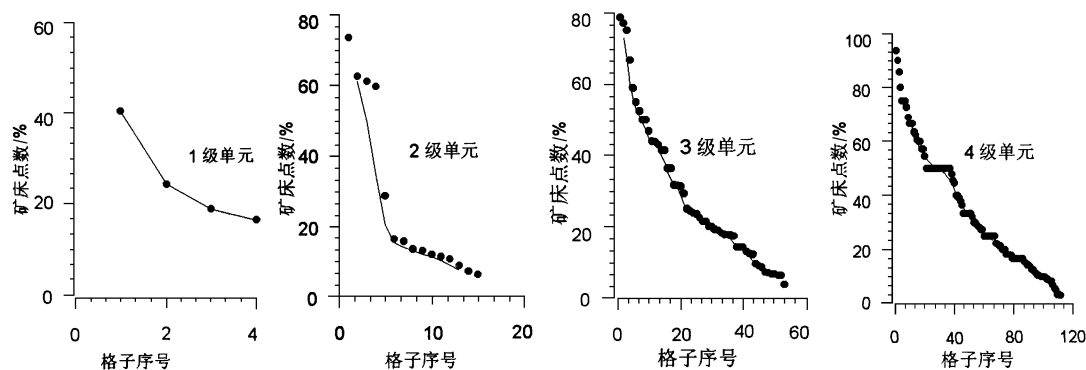


图2 浙中隆起带不同等级单元(长方形格子)中萤石矿床的数量分布百分比

Fig. 2. Percentage of fluorite deposits in various hierarchical cells (boxes) of central Zhejiang uplift.

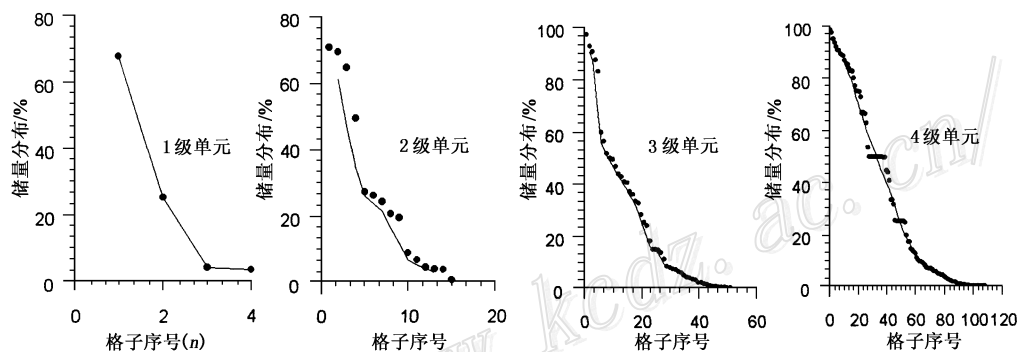


图3 浙中隆起带不同等级单元(长方形格子)中萤石矿床的储量分布百分比

Fig. 3. Percentage of reserves of fluorite deposits in various hierarchical cells (boxes) of central Zhejiang uplift.

床点数还是储量, 计算的成矿强度指数 P 分布的图形都是非常相似的, 尤其在第3和第4两级单元之间, P 分布图形的差异已很小。另一方面, 在1级单元划分的情况下, 成矿强度指数 P 较高的单元含有40%左右的矿床点数和69%左右的储量, 而 P 较低的单元只有16%的矿床点数和3%的储量, 两者矿床数目之比为2.5, 储量之比为23; 在4级单元中, 成矿强度指数 P 较高的单元占有约94%的矿床点数和97%的储量, 而 P 最低的单元仅有3%的矿床点数和0.03%的储量(注意这里是以其上一级单元为基数的百分比, 而并非是与0级单元相比)。上述这种矿床分布的层次结构表明, 当我们用不同大小的单元对一地区的矿床点数或储量分布进行统计考察时, 就像是用倍数逐步放大的显微镜观察, 总是可以发现有些单元的矿化非常富集, 有一些单元的矿化很贫, 并且每一次观察到的矿床分布结构图象都与上一次看到的基本相似。然而, 随着单元的划分更加细小时, 矿化分布的集中程度仿佛趋于“饱和”, 如图2和图3中的第3与第4两级单元。每个4级单元的面积(为 $22.25\text{ km} \times 12.125\text{ km}$, 约等于 270 km^2)仅为浙中隆起带(0级单元)面积(约 68000 km^2)的0.4%, 但是在成矿强度较高的单元中却集中有占整个隆起带萤石矿床已知总储量67%以上的储量, 由此, 似乎可以把 250 km^2 左右这个范围作为萤石矿床密集区的空间尺度, 在密集区之外则是一些矿化很弱或几乎不含矿的空白区, 这说明萤石矿床分布在空间上是丛集的。上述结果令人十分感兴

趣, 因为对金、银、铜、铅锌等许多矿床, 如果应用这种单元递归法也能揭示并定量表征其矿床密集区的空间尺度, 那么在矿产勘查实践中就可以依据这种尺度来制定既经济又不会漏掉重要矿床密集区的最佳勘查网度, 以达到快速逼近潜在矿床密集区的目的。显然, 在密集区内部仍然存在更细微的结构, 并且矿化分布同样是极不均匀的, 但是如上所述, 在单元面积为 $22.25 \text{ km} \times 12.125 \text{ km}$ 时, 矿化分布的集中程度已趋于“饱和”, 这里除了数据量的限制外 (因为每个最终的小单元必须有足够的矿床点数, 以保证统计分析时有足够的精度), 可能还有成矿作用机理方面的约束。

4 空间分形丛集分布

分形的基本属性是自相似性, 它表现为当把尺子 r 变换为 λr 时其自相似结构不变。这种尺度变换下的不变性称为标度不变性, 也称为标度律。在一般情况下, 可以把标度律写为

$$f(\lambda r) = \lambda^\alpha f(r) \quad (2)$$

f 是某一被标度的物理量, α 是标度指数, 它与分维数 D 一般存在简单的代数关系。

下面应用 Mandelbrot (1985)^[14] 推广的数盒子法考察矿床在空间上的丛集分布。在不考虑单个矿床之间在体积和赋矿深度上的差异, 即把矿床视为空间上的一个点集时, 将整个研究区域划分成边长为 r 的若干正方形单元, 当格子的大小不同时, 分别统计出有矿格子数 $N(r)$, 即舍去不含矿的格子。 $N(r)$ 显然与 r 有关。当 r 足够小时, 则所需最少格子数 $N(r)$ 与 r 之间存在如下关系

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

或

$$\lg N(r) = \lg k - D \lg r \quad (3)$$

这里, D 为分维数, 其取值范围为 $0 < D < 2$, k 是比例常数。以 $N(r)$ 与 r 作双对数坐标图, 其直线部分的斜率即为式 (3) 中的 D 。用数盒子法求分维数的操作方法如图 4 所示。规定 D

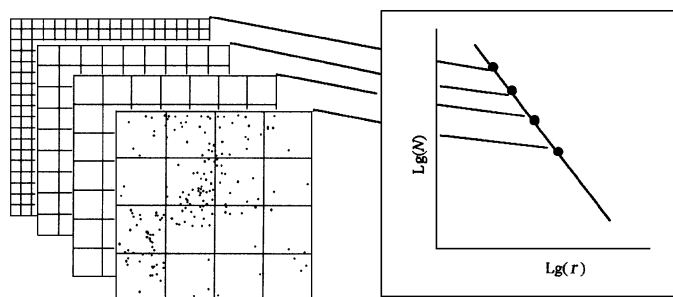


图 4 计算分形维数的数盒子法 (box-counting method) 图解。用边长为 r 的正方形格子覆盖研究区, 当格子大小变化时, 将含有矿床的格子数 N 与格子边长 r 投在双对数坐标图上, 通过对数据点拟合得到的直线的斜率求得分维数 D

Fig. 4. Schematic diagram showing the fractal box-counting method, in which a series of grids overlaid the data. The fractal plot of the number of boxes N containing data is plotted versus the box size r in lg-lg space. The slope of a straight-line fitted through the data is fractal dimension D .

的取值范围是 $0 < D < 2$, 这是因为当 $D = 2$, 相当于一个面的欧几里德维数, 这意味着整个研究区域完全被矿床所充填; 当 $D = 0$, 这是一个点的欧几里德维数, 即不论 r 如何改变, 含有矿床的格子数 $N(r)$ 总是等于 1 或研究区域内的矿床数目。所以就研究实际的矿化空间分布来说, 这两种情况都没有意义。由此可见, 在 $0 < D < 2$ 范围内, D 越小, 矿床分布的丛集程度越高。

图 5 中 A、B、C 分别表示了用上述方法对浙江全省、浙中隆起带和武义-永康盆地萤石矿床统计的结果。为了便于分析对比, 将这 3 个区域范围的萤石矿床在空间上分形丛集分布的分维数值及相应的无标度区间概括于表 2。由这些统计结果可以获得如下几点认识:

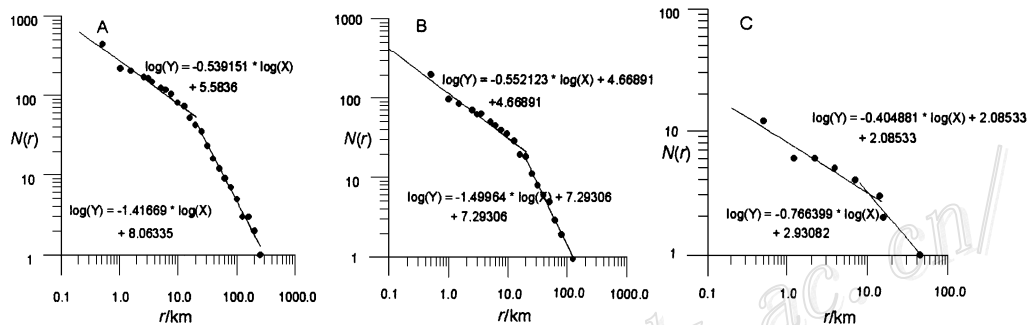


图 5 浙江省不同区域范围内萤石矿床分形丛集直径 r -丛集数 $N(r)$ 图解
A—全省范围; B—浙中隆起带; C—武义-永康盆地

Fig. 5. Number of clusters versus clustering diameter for fluorite deposits in various regions.
A—Whole Zhejiang; B—Central Zhejiang uplift; C—Wuyi-Yongkang basin.

表 2 浙江省不同区域范围内萤石矿床的分形丛集分布特征

Table 2. Fractal dimension (D) and scale-free area (km) of fractal distribution for fluorite deposits in various regions of Zhejiang by the box-counting method

地区	面积/km ²	无标度区间/km	分维数	相关系数 (R)	标准差 (E)	矿床点数目 (N)
浙江省	100000	0.5~15 (r_1)	0.539 (D_1)	0.938649	0.018777	629
		15~250 (r_2)	1.417 (D_2)	0.987186	0.016925	
浙中隆起带	69840	0.5~15 (r_1)	0.552 (D_1)	0.953083	0.088557	552
		15~120 (r_2)	1.50 (D_2)	0.989465	0.008855	
武义-永康盆地	1000	0.5~15 (r_1)	0.405 (D_1)	0.846717	0.034370	116
		15~40 (r_2)	0.766 (D_2)	0.947828	0.028282	

(1) 尽管研究地区的面积大小悬殊, 成矿地质环境及赋矿岩性也不尽相同, 但是萤石矿床在空间分布上显示了一种明显共同的特征, 即矿床在空间上并非彼此毫不相干的孤立事件, 而是遵循分形丛集分布, 并且普遍地存在两个无标度区及在不同的无标度区间具有不同的分维数值, 且均不存在分维数 D 等于 0 或 2 的情况, 显示了多重分形的特征。

(2) 在 0.5~15 km (r_1) 尺度范围内, 3 个区域萤石矿床的分维数 D_1 分别为 0.539、0.552

和 0.405, 差异很小, 表明导致这些矿床形成的地质过程和物理化学过程并无本质的差异。这与先前通过地质学和地球化学研究得到的结论一致。

(3) 多重分形概念揭示了分形内部不同层次或局域的精细结构。在同一层次内, 物体具有简单分形的特征, 但是各层次间有不同的统计特征。每个层次或局域的尺度范围对该层次而言, 即为其无标度区间 (在此区间内不存在特征尺度), 但是对整个多重分形集来说, 它却是在某个分辨率下多重分形内部各个层次所特有的无标度区间, 因此也可以被看作是表征了多重分形内部不同层次范围的“特征尺度”。对于数盒子法来说, 当以不同大小的盒子 (单元) 去覆盖一个研究区时, 也就意味着在采用不同分辨率的观察尺度考察矿床的空间分布。一般, 较小的 r 对应着较高的分辨率。因此, 从矿产勘查的角度看, 更有价值, 我们也更感兴趣的是与 D_1 相对应的无标度区间 r_1 。如表 2 所示, 所考察的这 3 个地区面积差异悬殊, 但 D_1 存在的无标度区间 (r_1) 均在 0.5~15 km 左右, 并且其上限 (15 km) 与在上一节中用单元递归方法得到的结果 (表征萤石矿化密集区的尺度 22.25 km × 12.125 km) 大致相同。在 0.5~15 km 尺度内, $D_1 = 0.405 \sim 0.552$, 表示在密集区内所有萤石矿床 (矿体) 的分布仍旧是不均匀的, 但遵循分形分布。由于在无标度区内物体具有自相似结构, 因此在已知矿床密集区内进行勘查时, 可以利用这一性质来增大数据的分辨率, 提高找矿效果。至于 D_2 存在的无标度区间 r_2 , 则可能表明了在该尺度范围内矿床密集区 (或矿田) 的分布也是分形。

5 结 论

(1) 浙江萤石矿产无论矿床点数目还是储量的空间分布, 都具有明显自相似的层次结构, 并且在各层次上矿化的分布均呈现丛集倾向。采用单元递归方法对萤石成矿强度指数计算的结果揭示了萤石矿床密集区的空间尺度为 250 km² 左右, 在矿化高度富集的单元内, 以 0.4% 的面积占有了浙中隆起带萤石矿床已知总储量 67% 以上的储量, 相当于全省萤石总储量 54% 以上, 在矿床密集区之外则是一些矿化很弱或几乎不含矿的空白区。

(2) 对浙江省、浙中隆起带和武义-永康盆地 3 个不同尺度范围萤石矿床的分形丛集分析结果表明, 在 0.5~15 km 尺度内具有比较一致的分维数 (D 分别为 0.539、0.552 和 0.405), 暗示了这些矿床尽管成矿地质环境及赋矿岩性不尽相同, 但可能有着同一的成因机制, 这与李长江、蒋叙良^[7-9]先前通过地质学和地球化学研究得到的结论一致。

(3) 无标度区间 0.5~15 km 的上限 (15 km) 与萤石矿床密集区 (约 250 km²) 的线性尺度基本一致, 并且分维数 D 为 0.405~0.552, 表明在密集区内所有萤石矿床 (矿体) 的分布仍旧是不均匀的, 但遵循分形分布。由于在无标度区内物体具有自相似结构, 因此在已知矿床密集区内进行勘查时, 可以利用这一性质来增大数据的分辨率, 提高找矿效果。

参 考 文 献

- 1 陈颢, 陈凌. 分形几何学 [M]. 北京: 地震出版社, 1998.
- 2 李长江, 徐有浪, 蒋叙良. 论矿床的分形性质 [J]. 浙江地质, 1994, 10 (2): 25~32.
- 3 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.
- 4 李长江, 麻士华, 徐有浪. 对浙江地质找矿的几点思考 [J]. 浙江地质, 1996, 12 (2): 62~67.
- 5 李长江, 麻士华, 胡永和等. 快速逼近潜在超大型矿床的新理论和新方法, 第六届全国矿床会议论文集 [C]. 矿床

- 地质, 1998, 17 (增刊): 855~ 860.
- 6 李长江, 麻士华等. 矿产勘查中的分形、混沌与 ANN [M]. 北京: 地质出版社, 1999.
 - 7 李长江, 蒋叙良. 浙江武义—东阳地区萤石矿床的锶同位素地球化学研究 [J]. 矿床地质, 1989, 8 (3): 65~ 74.
 - 8 李长江, 蒋叙良. 浙江萤石矿床的裂变径迹年龄测定及有关问题讨论 [J], 地球化学, 1989, 2: 181~ 188.
 - 9 李长江, 蒋叙良. 中国东南部两类萤石矿床的成矿模式 [J]. 地质学报, 1991, 65 (3): 263~ 274.
 - 10 Blenkinsop T. The fractal distribution of gold deposits: Two examples from the Zimbabwe Archean Craton [C]. In: Kruhl J. H., ed. Fractals and dynamic systems in geoscience, Springer Berlin Heidelberg, New York, 1994, 247~ 258.
 - 11 Carlson C A., Spatial distribution of ore deposits [J]. Geology, 1991, 19 (2): 111~ 114.
 - 12 Li Changjiang, Wang Guowu. Isotopic geochemistry of Chinese fluorite deposits [J]. International Geol. Rev., 1996, 38: 1054~ 1067.
 - 13 Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature [M]. San Francisco: Freeman, 1982.
 - 14 Mandelbrot B B. Self-affine fractals and fractal dimension [J]. Physica Scripta, 1985, 32: 257~ 260.

SPATIAL DISTRIBUTION OF FLUORITE DEPOSITS IN ZHEJIANG PROVINCE

Ma Tuhua, Zhu Xingsheng and Li Changjiang

(Zhejiang Institute of Geology and Mineral resources, Hangzhou 310007)

Key words: fluorite deposit, cell-recurrence method and fractal box-counting method, spatial scale of densely mineralized area

Abstract

This paper has applied the cell-recurrence method and fractal box-counting method to the statistical analysis of 629 fluorite deposits or ore spots in three different areas of Zhejiang Province. The authors have reached the following conclusions: (1) All fluorite deposits in three areas are exclusively in fractal clustering distribution in space and have fairly similar fractal dimensionalities (0.539, 0.552 and 0.405 respectively), implying that, though different in ore-forming geological environments and host rocks, these fluorite deposits might have been controlled by a general ore-forming mechanism. (2) The densely mineralized area of cluster distribution is spatially characterized by about 250 km². In mineral exploration, this technique will contribute to establishing optimum exploration network, which is economical and can surely detect important deposits.