第 14 卷第 1 期
2008 年 3 月

地 质 力 学 学 报
JOURNAL OF GEOMECHANICS

Vol.14 No.1
Mar. 2008

文章编号：1006-6616（2008）01-0057-08

中国白垩纪矿床时空分布的分形分析

申 维

（中国地质大学资源环境管理实验室；地质过程与矿产资源国家重点实验室；
岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室，北京 100083）

摘 要：分形概念应用在地球科学中来刻画地质变量与地质体自相似特征。研究表明分形模型常常提供有力工具来刻画地质变量和地质体的基本空间分布结构。许多地质现象的频度和大小之间的分布具有尺度不变性，如岩石碎片、断层、地震、火山喷发、矿藏和油井等。中国白垩纪的矿床大量地分布在东北、阴山—燕山、华北地台、秦岭—大别山、扬子地台和东南沿海等 6 个矿集区，它们是中国白垩纪矿床分布的重要地区，而西北和西南地区已知的白垩纪矿床尚少；中国白垩纪矿床分布具有在时间上集中于早白垩世，在空间上集中于东北和华南的分形特性。以中国白垩纪金矿床为例，对金矿床空间分布进行了分形建模与预测，该方法不仅适用于金矿床，而且还适用于其它矿床，具有普遍的意义。

关键词：分形；自相似；白垩纪矿床；矿集区

中图分类号：P617 文献标识码：A

0 前言

20 世纪 70 年代末，分形理论开始引入成矿规律及成矿预测中[1]。Mandelbrot BB. 认为，高品位铜矿的分布是不均匀的，在每一储铜区中，无论区域大小，其高品位铜矿的相对分布是相同的，高品位铜矿可看作是由低分维相似性分形集合“集中”或“支持”的，品位较低的铜矿可视为受到一个高维分形集合的支持，从而得出铜矿的分布存在多重分形结构[2]；Turcotte DL. 对矿石平均品位和矿床累计储量的研究表明，二者之间存在幂函数关系，即分形结构的认识，在给出有经济价值矿物形成模型的基础上，建立了矿石平均品位和累计储量的分形关系模型[3]；秦长兴等认为金属矿床的空间位置、矿化的空间分布、矿田构造形迹（矿脉）具有自相似性[4]；Cheng QA. 通过单分形和多重分形方法将地球化学异常从背景中分离出来，以元素浓度等值线的长度（周长）和圈闭的面积，建立元素浓度-面积及周长-面积的双对数坐标图，详细分析了与铜、金斑岩体系伴生的蚀变带中的 Au、Cu、As、Ag、K_2O 和 SiO_2 的空间分布特征[5,6]；申维等系统地研究了矿床分布的自相似性质，提出了一般

收稿日期：2006-10-31

基金项目：国家重点基础研究发展计划项目（No.2006CB701400），资源环境管理实验室开放基金项目（编号 REM06012）和国家自然科学基金项目（No.40672196，40638041）

作者简介：申维（1957-），男，教授，出站博士后。主要从事非线性地质学的科研和教学工作。E-mail：shenwei@cugb.edu.cn；shenweihome@sina.com。

分形模型和多维自仿射分布概念，并将分形理论应用到矿产预测中[7,8]。诸如此类的研究表明，分形理论正日益渗透到成矿规律与成矿预测、矿床勘查与评价中。

地球环境和天文环境在白垩纪时期发生了重大异常，是地球系统科学的关键与重要时期。白垩纪地球整体事件的异常现象以火山岩浆活动、地磁极性、洋脊开裂速度、巨型金属成矿、大洋缺氧、黑色岩系、巨型油气成藏、CO_2 等气体喷发、海水温度升高、海平面上升、天文环境等异常变化最为明显。本文应用分形理论对中国白垩纪矿床时空分布进行初步研究，为开创白垩纪若干重大地质事件的非线性科学研究提供一个范例，进一步找寻白垩纪矿床开拓思路，推动地球科学的定量理论进一步发展。

1 矿床分布的分形现象

矿床在地壳中的分布具有一定规律性。在时间上，矿床不是均匀地分布于各个地质时代，而是在某个时代相对集中，这就是成矿期问题；在空间上，矿床也不是均匀地分布于各个（类）地质体中，而是集中在某个（类）地质体中，这就是成矿区问题。为什么矿床的时空分布会出现这种特征？其中是否存在内在本质的规律？Contor（康托）集合可以给予我们有益的启示。

地壳中元素和矿化分布的不均匀是一个普遍规律。在全球范围内，矿床往往集中分布在几个成矿带中，在成矿带内矿床又集中在若干个成矿省；一个成矿省内矿床通常只集中在几个矿化密集区内；在一个密集区内的矿床，特别是一些大型、超大型矿床主要集中在一、二个矿田内；在一个矿田内，尽管可以有许多矿床和矿点产出，但往往是一、二个矿床占据矿田矿石储量绝大部分；甚至一个矿床中，70%～90%以上的矿石储量往往被一、二个主矿体所占有。例如，统计资料表明①，世界金属矿产总储量的 46%集中在仅占矿产地总数 0.25%的大型、超大型矿床中，32%的储量蕴藏于占矿产地总数 12.5%的中型矿床中，而不具有经济价值的矿点则占矿产地总数 85.75%。在中国华南已知的 1200 余个钨矿床和矿点中，超大型矿床占 0.8%，但却占了总储量的 62%，而达到矿床和矿点总数 93.5%的小型矿床和矿点的储量仅为总储量的 6%。中国的一些萤石矿床，尽管在一个矿床中可以有若干条矿脉，总储量达数万吨以上，但其中 90%以上的储量却常常集中在一条矿脉中。由此从超大型矿床到小型矿床，再到矿点、矿化，它们在空间分布上具有分形丛集性。

如果把某一地区（或全球范围）分成许多大小相等的单元，可发现有些单元有矿床，在有矿单元之间存在若干无矿单元。之后再把有矿单元分成更小的单元（大于单个矿床的线性尺度），又发现有矿聚群和无矿的单元。在任何一个矿聚群中，无论单元的尺度多么小，只要大于单个矿床的尺度，其中总存在若干无矿的单元。由此，可以把矿化的分布看成是随 Contor 集合在空间上的分布。

许多矿体是离散分布的透镜状矿体不断地在构造破碎带中尖灭再现，常可见到间隔一定距离重复出现的含金石英脉矿体与无矿破碎带交替排列，两者的间隔与各自长度均在一定范围内稳定而有规律地变化。如果就一条含金石英脉矿体来看，其中又可分出富矿段和贫矿段，富矿段中还可进一步分出富矿包和无矿间隔，直至手标本尺度。含矿与无矿、富矿与贫矿出现交替规律，从最高一级到最低一级皆如出一辙。具有这种自相似嵌套结构的矿化现象

① 北京矿产地质研究所，金属矿产总储量研究报告，1987

从矿体到手标本共可分辨出 4 ~ 5 级，反映着金矿体的形态、矿化分布规律及其成因，均与 Cantor 集合具有极为相似的数学结构，因此它无疑是一种分形体。

白垩纪微细浸染型金矿床在全球的分布主要集中于美国和中国，而在世界其他国家和地区，这种金矿的出现只有零星的报道。金矿的相对密集区只见于美国内华达州及邻近地带和中国扬子地台的西南缘与西北缘，具体表现为美国的卡林成矿带和中国的滇黔桂、川陕甘两个“金三角”；在成矿带或“金三角”内，矿床（点）的分布也是不均匀的，即使在载金矿物内部，超显微金粒的展布也显示出明显的不均匀性。可见，大到全球范围、小到矿物内部，金的分布具有一定的自相似性，即不均匀集中分布：国家（美国、中国）→“金三角”（滇黔桂、川陕甘）→矿区（黔西南、川西北、桂西北）→矿床（大型、中型不均匀分布）→矿体（脉状、透镜状、似层状或不规则状）→载金矿物（金在环带结构黄铁矿、毒砂等内部分布不均一）。

金属矿床大多分布在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。地质重演律是地质自相似规律[4]。地质重演律是地质作用发生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际上是在沉积成矿作用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趋势是相似的。

基本地质作用及控矿因素的自相似性导致矿床的特征的自相似性。例如矿床分布受成矿期活动的控制。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有自相似性，与花岗岩类有关的矿床因而也显示一定程度的自相似性。基本的物理作用、化学作用、生物作用等的自相似性导致地质作用及其产物的自相似性。地质作用是基本的物理作用、化学作用、生物作用等的综合。这些基本作用的自相似性特征，可导致地质作用及其产物的自相似性。例如化学反应的自相似性行为可部分地解释矿床矿物成分方面的自相似性。

在各种成因类型的金矿床中，几乎都存在几何上的分形结构，矿体往往就是某类的分形体。这类矿体一般难以应用传统的地质测量方法进行研究，运用分形理论有可能避开这种困难，单刀直入地把握住矿体延伸趋势，从而得到正确的隐伏矿体的空间分布。另一方面，除了矿体几何形态以外，各类反映矿化信息的实验、测试和取样数据中，也可能存在着典型的分形结构，探索并深入研究它们，可以从更深的层次上全面了解金的成矿过程及其富集规律，为成矿预测提供科学的分析依据。

2　中国白垩纪期间矿床时空分布的分形现象

中国白垩纪的矿床主要分布在东北、阴山—燕山、华北地台、秦岭—大别山、扬子地台和东南沿海等 6 个矿集区：

（1）东北超大型矿集区。该矿集区以北北东向盆岭构造为特点，中部是兴安岭造山带，西侧为海拉尔—锡林浩特盆地，东侧为松辽盆地。如内蒙古的巴尔哲超大型稀土稀有金属矿床（125 ~ 127Ma）[9]；闹牛山、莲花山、布墩花等地的铜多金属矿床；浩布高、甲乌拉、查干布拉根、三河、二道河等地的铅锌矿；刘房子、羊草沟和石碑岭等地的膨润土矿床；黑龙江的团结沟、杜家河和东安（大型）等金矿。

(2) 阴山—燕山(华北地台北缘)东西向矿集区。如河北的蔡家营铅锌矿(119~134Ma,113~158Ma)[10,11]、辽宁的二棚甸子式多金属矿床(含正岔、万宝)、通化式铜矿、南岔—沙窝沟式金矿(含金厂沟);金厂沟梁—二道沟多金属矿床(金矿为72~121Ma,铜矿为121~123Ma)[12];红花沟金矿(81Ma)[13];辽宁排山楼金矿(125Ma)[14];撰山子金矿(123Ma)[15];安家营子金矿(126~132Ma)[16]。

(3) 华北地台超大型矿集区。该矿集区自西向东由鄂尔多斯→晋陕高地→太行山→华北盆地→胶辽隆起等次级单元构成,已知的白垩纪矿床有[17]:山西的义兴寨金矿、支家地银矿、刁泉式铜金银矿和塔儿山式铁金矿;钓鱼台超大型硫铁矿、涌泉庄膨润土矿及宋官疃、化山和荆山等重晶石矿;邢家山的大型铝矿和孔辛头的铜铝矿;胶东地区金矿床成矿年龄多数集中在100~126Ma[18]。玲珑金矿主成矿期为122Ma[19];郭家岭金矿主要金矿化期在120~126Ma,成矿后花岗斑岩脉的年龄为120Ma[20];新城金矿黄铁绢英岩的Rb-Sr等时线年龄为117Ma[19];焦家、仓上等大型超大型金矿的成矿时代主要集中在100~117Ma[17];栖霞金矿主成矿期为126Ma[21];胶东蓬家夼金矿(101Ma)[22];颇具工业规模的宋家沟金矿床[23];位于著名的新城—焦家的金矿田范围内河西金矿床[24]。

(4) 秦岭—大别山(华北地台南缘)东西向矿集区。如雷门沟铝矿和祁雨沟金矿,在中部大别山地区尖山大型萤石矿床、上天梯—刘家冲膨润土矿及王城芒硝矿[25]。小秦岭地区的东闯大型金矿形成于143~128Ma[26];河南省罗山县皇城山银矿床[27]。

(5) 扬子地台超大型矿集区。如四川的大铜厂、云南的大村、六直、牟定等铜矿床;四川的金华(超大型)、眉山、白塔、公义、邓庙、草坝等芒硝矿床;在长江中下游的江苏甲山大型膨润土矿、湖北的子陵铺和麻城铺超大型石膏矿;江苏的梅山、麒麟山及安徽的凹山、姑山、白象山等铁矿;湖北的阮家湾钨铝矿、龙角山铜钨矿、安徽的沙溪铜矿、江苏的安基山铜矿和伏牛山铜矿等;在南岭及滇东南地区则形成了目前世界上最重要的锡多金属矿带,包括广西灰方—熬爹菊、个旧在内的超大型锡多金属矿床,均形成于白垩纪。其他的大中型矿床还有云南的白牛厂银多金属矿床、老君山钨矿和广西的五好锑矿、大明山钨矿、两江铜矿、笔架山水晶矿床、芒场锡矿和高田钨矿等;安徽铜陵铜(金)、铁矿(133~143Ma)[28]。

(6) 东南沿海北东向超大型矿集区。如浙江的矾山超大型明矾石矿床、后岸银矿和金田寺银矿;广东的厚婆坳和西岭锡矿;海南的羊角岭超大型水晶矿、什统大型萤石矿及富文金银矿、泗顶岭水晶矿、石门山铝矿、后万岭铝矿及南好多金属矿床等;安徽的白茅岭大型萤石矿、新潭和大山的大型膨润土矿,江西的谢坊大型萤石矿和岩背锡矿;浙江遂昌治岭头金矿(82~107Ma)[29];福建省双旗山金矿[30];福建紫金山铜金银矿[31];福建毛洋头铀(银、钼)矿床(127Ma)[32];6722铀矿床(107Ma)[33]以及大铜厂、鹿厂和白草洞三个富银铜矿床[34]。

如果矿床分布的分形现象是普遍规律,那么中国白垩纪矿床的时空分布当然不例外。研究表明:中国白垩纪的矿床主要有6个矿集区(如华北地台矿集区),而每个矿集区内有若干个矿化密集区(如胶东金矿密集区);在每个密集区内有若干个矿床(如焦家、玲珑、蓬家夼、发云夼等金矿床),特别是几个大型、超大型矿床;在每个矿床内有若干个矿体,如此等等(图1)。以上证据表明,中国白垩纪矿床在时空分布上具有分形丛集性,成矿时间集中在110Ma~145Ma时期,我们有理由认为中国白垩纪的成矿作用具有分形特性,即在时间上早白垩世强于晚白垩世,在空间上东北强于西北,华南强于华北。

图 1　康托点集的结构与矿床的分布对应关系

Fig.1　Corresponding relation between the structure of the Cantor set and distribution of deposits

3　中国白垩纪期间金矿床数量分形模型与预测

设分形模型

$$N(r) = CrD \qquad r > 0 \tag{1}$$

其中 r 表示特征尺度，$C>0$ 称为比例常数，$D>0$ 称为分维数，N（r）$=N$（$\leqslant r$）表示尺度小于等于 r 的数目。

许多地质现象具有标度不变的特征，如岩石碎片、断层、地震、火山喷发、矿藏和油井等。这些现象的频度和大小之间的分布具有尺度不变性。分形分布的特点要求小于等于某一尺度的数目或和数，与物体大小之间存在幂指数关系，即（1）式的关系。例如 r 可表示圆的半径，N（$\leqslant r$）表示落入半径为 r 圆中矿体的个数。我们将观测数据（r_1，r_2，…，r_n）和（N（r_1），N（r_2），…，N（r_n））绘在双对数坐标系统中（即 $\ln r-\ln N$（r）），连接各点，曲线存在明显的直线段，即存在无标度区。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，无标度区一部分所得到的结论可以外推到整个无标度区。

根据中国地质科学院 2005 年编制的中国金属矿产分布图（比例尺 1∶5000000，矿床资料截至 2003 年），提取成矿时代为白垩纪金矿床的信息，不考虑金矿床各种类型，从而得到中国白垩纪金矿床分布图（比例尺 1∶5000000）。在该金矿床分布图上，把每个矿床看成是以其中心为代表的一个点，以矿体分布的重心（中心）为圆心，圆心不动，以不同的半径 r 画圆，计算每次落入圆中矿床的个数，记为 N（r）（表 1）。在 $\ln r-\ln N$（r）坐标中投点，用最小二乘法拟合直线，得直线方程为

$$\ln N(r) = 1.06\ln r + 1.65 \tag{2}$$

$$R^2 = 0.94 \quad 15 \leqslant r \leqslant 45$$

我们得到分维数 $D=1.06$。以上方程均通过显著性检验。金矿床数量的空间分布在［15，45cm］的范围（无标度区）内具较好的分形结构即自相似性。因此，在矿床自相似性体系内，可以将该无标度区的上限外推至 45cm，此时分形结构不发生改变或改变不大。矿床预测模型为：

$$N(r) = 5.21r^{1.06} \qquad 15 \leqslant r \leqslant 50 \tag{3}$$

将 r 回代入上面（3）式中，计算在 $r=50$cm 时的金矿床数量（329 个）减去已知的金矿床数量即为预测值。结果为：金矿床 73 个（取整）（图 2）。

表 1　金矿床数量数据

Table 1　Number of gold deposits

r（cm）	15	20	25	30	35	40	45
N（r）（个）	80	130	171	216	237	247	256

密度定义为　$\rho = N$（r）/（πr^2）$=$（C/π）r^{D-2}

当 $D=2.0$ 时，密度 $\rho = C/\pi$。表明

密度均匀。

当 $D>2.0$ 时，密度 ρ 随着 r 的增大而增大。

当 $D<2.0$ 时，密度 ρ 随着 r 的增大而减少。

当 $r=1.0$ 时，$C=\pi\rho=N$ (1)。

矿床数量分维数 $D=1.06<2$ 表明，随着 r 的增大时，矿床数量密度逐步减少。

因此分维数 D 定量表达矿床分布的密度变化趋势。C 表示矿床分布的初始值，它们对矿产资源勘查、预测与评价具有一定的指导意义。

4 讨论与结论

①中国白垩纪矿床的成矿系列和作用主要与燕山期壳幔双源基性—中酸性—碱性浅成超浅成侵入岩、壳幔源侵入—喷出岩、壳源花岗岩和火山—侵入活动有关。在白垩纪 120～125Ma 期间，翁通爪哇海台的形成与 Aptian 地幔柱密切有关，中国东部大规模成矿作用的爆发期正是处于这一期间，如胶东的金矿、长江中下游的多金属矿床、华南的铀矿及有色金属矿床等。

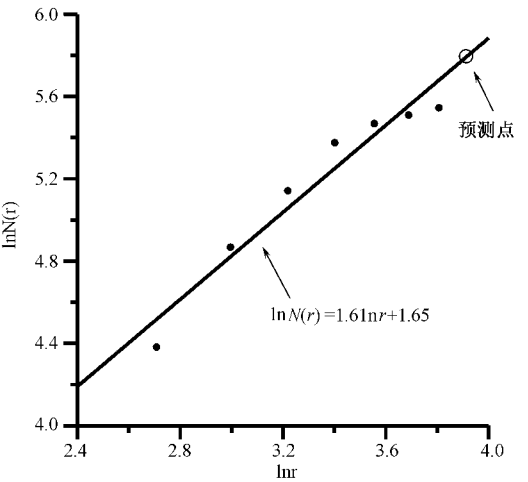

图 2 金矿床数量数据曲线拟合图

Fig.2 Plot of curve fitted to the number of Au deposits

②形成于白垩纪的矿床大量地分布在东北、阴山—燕山、华北地台、秦岭—大别山、扬子地台和东南沿海等 6 个矿集区，自北向南形成了若干个大规模成矿集中区，它们是中国白垩纪矿床分布的重要地区，而西北和西南地区已知的白垩纪矿床尚少；中国白垩纪矿床分布具有在时间上集中于早白垩世，在空间上集中于东北和华南的分形特性。

③白垩纪矿床在西北和西南地区发现很少，因此该地区找矿潜力很大。而在东部地区，研究程度虽高，找到的白垩纪矿床较多，但只要开拓新的思路，深入进行研究，仍可以取得找矿新成果。以中国白垩纪金矿床为例，对金矿床空间分布进行了分形建模与预测。预测中国白垩纪金矿床找矿潜力为 73 个。该方法不仅适用于金矿床，而且还适用于其它矿床，具有普遍的意义。

致谢：本文得到了中国地质大学（北京）《成矿系统演化对深部过程与浅表环境的响应》创新团队建设项目，高等学校学科创新引智计划资助（编号 B07011）和地质过程与矿产资源国家重点开放实验室项目资助。

参 考 文 献

[1] Mandelbrot BB. Fractals：forms，chance and dimension [M]. San Francisco：WH Freeman，1977.

[2] Mandelbrot，BB. Multifractal measures，especially for the geophysicists. Pure and Applied Geophysics [J]. 1989，131 (1)：5～42.

[3] Turcotte DL. Fractals and chaos in geology and geophysics (2nd ed) [M]. Cambridge：Cambridge Univ. Press，1997.

[4] 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.

[5] Cheng QA. Spatial analysis method for geochemical anomaly separation [J]. Journal of Geochemical Exploration [J]. 1996, 56 (1): 183 ~ 195.
[6] Cheng QA. Multifractality and spatial statistics [J]. Computers & Geosciences, 1999, 25 (9): 949 ~ 961.
[7] 申维. 分形混沌与矿产预测 [M], 北京：地质出版社, 2002.
[8] Shen W, Zhao P D. The theoretical study of statistical fractal model and its application in mineral resource prediction [J]. Computers & Geosciences, 2002, 28 (3): 369 ~ 376.
[9] 王一先,赵振华. 巴尔哲超大型稀土铌铍锆矿床地球化学和成因 [J]. 地球化学, 1997, 26 (1): 24 ~ 35.
[10] 张长江. 河北蔡家营铅锌（金银）矿床地质特征 [J]. 矿床地质, 1990, 9 (4): 301 ~ 308.
[11] 黄典豪,丁孝石, 吴澄宇, 等. 蔡家营铅锌—银矿床 [M]. 北京：地质出版社, 1992.
[12] 周乃武. 金厂沟梁金（铜）矿田成矿时代的理顺 [J]. 黄金学报, 2000, 2 (3): 180 ~ 185.
[13] 胡达骧,罗桂玲. 河北张—宣金矿区含金石英脉 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄 [J]. 地质科学, 1994, 29 (2): 151 ~ 158.
[14] 罗镇宽,苗来成, 关康, 等. 辽宁阜新排山楼金矿区岩浆岩锆石 SHRIMP 定年及其意义 [J]. 地球化学, 2001, 30 (5): 483 ~ 490.
[15] 王时麒,孙承志, 崔文元. 内蒙古赤峰地区金矿地质 [M]. 呼和浩特：内蒙古人民出版社, 1994.
[16] 李永刚,翟明国, 杨进辉, 等. 内蒙古赤峰安家营子金矿成矿时代以及对华北中生代爆发成矿的意义 [J]. 中国科学（D), 2003, 33 (10): 960 ~ 966.
[17] 王登红, 陈毓川, 徐志刚. 中国白垩纪大陆成矿体系的初步研究及找矿前景浅析 [J]. 地学前缘, 2005, 12 (2): 231 ~ 239.
[18] 韩淑琴,邓军, 杨立强, 等. 三维构造应力场分析在胶东招远—平度断裂带中段深部金矿探查中的应用 [J]. 地质力学学报, 2006, 12 (3): 338 ~ 344.
[19] 杨进辉,周新华. 胶东地区玲珑金矿矿石和载金矿物 Rb-Sr 等时线年龄与成矿时代 [J]. 科学通报, 2000, 45 (14): 1547 ~ 1553.
[20] 关康,罗镇宽, 苗来成, 等. 胶东招掖郭家岭花岗岩锆石年代学及其 Pb 同位素特征 [J]. 地球学报, 1997, 18 (增刊): 142 ~ 144.
[21] 翟建平,徐光平, 胡凯. 栖霞金矿矿物、流体和同位素特征及意义 [J]. 矿床地质, 1998, 17 (4): 307 ~ 313.
[22] 张连昌,沈远超, 刘铁兵, 等. 胶东蓬家夼金矿控矿构造地质地球化学特征 [J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24 (4): 377 ~ 384.
[23] 张竹如,唐波, 聂爱国, 等. 山东省牟平宋家沟金矿床地质特征 [J]. 黄金, 2001, 22 (7): 1 ~ 5.
[24] 徐贵忠,应汉龙, 周瑞, 等. 论胶西北河西金矿床成因及其动力学条件 [J]. 矿床地质, 2002, 21 (3): 246 ~ 255.
[25] 李毅,胡海珠. 河南木厂河区银、金、铜矿床的构造控矿特征 [J]. 地质力学学报, 2006, 12 (3): 345 ~ 353.
[26] 李强之,陈衍景, 钟增球, 等. 小秦岭东闯金矿成矿作用的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代学研究 [J]. 地质论评, 2002 (增刊): 122 ~ 126.
[27] 吴宏伟. 皇城山银矿床地球化学特征及预测评价 [J]. 地质与勘探, 2004, 40 (3): 26 ~ 30.
[28] 王彦斌,刘敦一, 曾普胜, 等. 安徽铜陵地区幔源岩浆底侵作用的时代——朝山辉石闪长岩锆石 SHRIMP 定年 [J]. 地球学报, 2004, 25 (4): 423 ~ 427.
[29] 李升先. 对遂昌治岭头金矿的几点看法 [J]. 浙江地质, 1998, 14 (2): 423 ~ 427.
[30] 刘连登,陈国华, 刘允良. 福建省双旗山浅成脉型金矿地质及其意义 [J]. 福建地质, 1999, 18 (1): 51 ~ 58.
[31] 黄仁生.福建紫金山矿田火成岩系列与浅成低温热液—斑岩铜金银成矿系统 [J]. 地质力学学报, 2008, 14 (1).
[32] 陈迪云. 毛洋头火山岩铀、银、钼矿床的控矿因素及成因 [J]. 矿床地质, 1997, 16 (2): 139 ~ 150.
[33] 章邦桐,饶冰, 陈培荣, 等. 论长英质隐爆角砾岩的气热流体溶浸成矿机制——以赣南 6722 铀矿床为例 [J]. 矿床地质, 2001, 20 (2): 129 ~ 136.
[34] 廖文,喻国东, 余子箴, 等. 四川大铜厂表生硫化物铜矿床成因探讨 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23 (1): 45 ~ 51.

FRACTAL ANALYSIS OF THE TEMPORAL-SPATIAL DISTRIBUTION OF CRETACEOUS MINERAL DEPOSITS IN CHINA

SHEN Wei

(*Laboratory of Resources Environment and Management*, *State Key Laboratory of Geo-Processes and Mineral Resources*, *Key Laboratory of Lithosphere Tectonics and Lithoprobing Technology of Ministry of Education*, *China University of Geosciences*, *Xueyuan Road* 29, *Beijing*, 100083, *China*)

Abstract: The concepts of fractals are used in the Earth sciences to depict the self-similar characteristics of geological variables and geologic bodies. The fractal model often provides powerful tools for characterizing the basic spatial distribution structure of geological variables and bodies. Many geological phenomena are scale invariant. Examples include frequency-size distributions of rock fragments, faults, earthquakes, volcanic eruption, mineral deposits and oil fields. Cretaceous ore deposits in China are largely distributed in six important mineral deposit-concentration regions, i. e. Northeast China, Paleo-Yinshan-Yanshan, Paleo-Qinling-Dabieshan, Yangtze platform and Southeast coastal region; whereas few deposits of Cretaceous age are known in Northwest China and Southwest China. Some important deposits have been discovered in eastern China. The distribution of Cretaceous deposits in China has the following fractal characteristics: in terms of time, they were concentrated in the Early Cretaceous, and in terms of space, they are mainly located in Northeast and Southeast China. Take for example Cretaceous gold deposits of China, the authors constructed a fractal model of the spatial distribution of gold deposits and predicted the number of gold deposits. The method is applicable not only to gold deposits but also to other ore deposits; so it has universal significance.

Key words: fractal; self-similarity; Cretaceous deposit; mineral deposit-centralization region