卷(Volume)26,期(Number)3,总(SUM)94
页(Pages)314~320,2002,9(Sep.,2002)

大地构造与成矿学
Geotectonic et Metallogenia

地理信息系统在地质现象分形研究中的应用

——以云南金矿成矿研究为例

张洪恩[1,2],陈广浩[2],黄怀勇[2]
(1. 中国科学院遥感应用研究所,北京 100101;2. 中国科学院长沙大地构造研究所,湖南 长沙 410013)

摘 要:地理信息系统和分形理论皆为蓬勃发展的新兴学科,是地学研究的有力手段。本文应用地理信息系统对云南金矿的集群分形分布、密度分形分布、储量分形分布进行了研究,并对云南地层进行了R/S分析。研究表明地理信息系统能满足大部分地质现象的分形研究的需要,且更简单精细,同时获得了一些对找矿勘查有价值的成果。

关键词:地理信息系统;分形;R/S分析;金矿;断层
中图分类号:P91;P618.51 文献标识码:A 文章编号:1001-1552(2002)03-314-07

分形理论创立于20世纪70年代,作为研究复杂系统和复杂现象的有力工具,已广泛应用于自然科学和社会科学的众多领域;地质学是最早应用分形理论的学科之一。所谓分形是指在一定尺度范围内事物在形态、功能或信息等方面具有自相似或标度不变特征。研究发现许多地质现象具有标度不变的特征。国内外学者对断裂、地震、矿床品位、储量等的分形研究,已取得许多重要进展[1982,Mandelbrot;1985,Barton, *et al.*;1986,Torcotte;1996,李长江;1998,施俊法;1998,丁式江]。

1963年,加拿大测量学家R. F. Tomlinson首先提出了"地理信息系统"这一术语,并建立了世界上第一个GIS产品——CGIS。自此,地理信息系统作为一门空间信息技术,以其广泛的适应性,迅速发展,已应用于地学研究、资源开发、环境保护、城市规划、土地管理、交通、能源等众多领域。

本次研究中在建立云南金矿-构造数据库的基础上,应用Mapinfo提供的空间分析工具,探讨了云南金矿(图1)在矿床群集分布、矿床密度、储量分布及断层的分形特征,揭示了一些对找矿勘查有实用价值的规律。

1 金矿床的集群分形分布

根据Mandelbrod(1985)推广的数盒子法,不考虑单个矿床之间在体积和赋矿深度上的差别时,将整个研究区划分成边长为δ的网格,分别取不同的δ值,统计出含矿的网格数$N(\delta)$,如果有:

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

则矿床是分形分布,其中C为常数,D即为分维值;研究时以$N(\delta)$和δ的对数值作线性拟和,其斜率即为分维值。在本研究中,利用金矿-构造数据库中的金矿资料,运用Mapinfo的网络分析功能和查询功能可以方便的以不同的边长δ_i划分网格和作出对$N(\delta_i)$统计。经对网格数$N(\delta)$和边长δ的对数作线性拟和,其结果见图2。

云南金矿集群分布存在两个无标度区间$D_1 = 0.4551$, $D_2 = 1.3203$。同时以同样方法对云南金构造成矿带[2000,张湘炳](图1)进行了分形分析,结果见表1。

收稿日期:2001-08-07;改回日期:2002-07-20
基金资助:本文得到中科院创新工程项目(KZCX-Y-03)及云南省院合作项目(YK98008-01)资助.
作者简介:张洪恩(1976-),男,在读博士,主要从事构造地质学及遥感分析.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　不同地区金矿集群分布分维值比较

Table 1　Comparison of fractal values of gold deposit groups in different areas

地　区	D_1	R_1^2	分界点(km)	D_2	R_2^2
中　国	0.3333	0.9853	80	1.3259	0.9978
中国华北	0.5500	0.9926	80	1.1067	0.9989
中国华南	0.6833	0.9952	80	1.2767	0.9986
中国浙江	0.192		40	0.717	
中国云南	0.4551	0.9567	50	1.3203	0.9964
R1	0.2197	0.9874	30	0.9286	0.9802
R2	0.1524	0.9344	20	0.7011	0.9712
R3	0.5351	0.9936	80	0.7048	0.9954
R4	0.1438	0.883	40	0.4409	0.9894
R5	0.3261	0.9495	50	0.7205	0.9593
R6	0.4032	0.99	40	1.0175	0.8727
R7	0.4335	0.8934	40	1.2874	0.706
R8	0.7317	0.8789			
R9	0.7125	0.993	50	0.9528	0.9774
R10	0.3018	0.9322	40	1.008	0.9809
R11	0.161	0.999	20	0.7134	0.9593
R12	0.4842	0.985	80	1.1165	0.9724

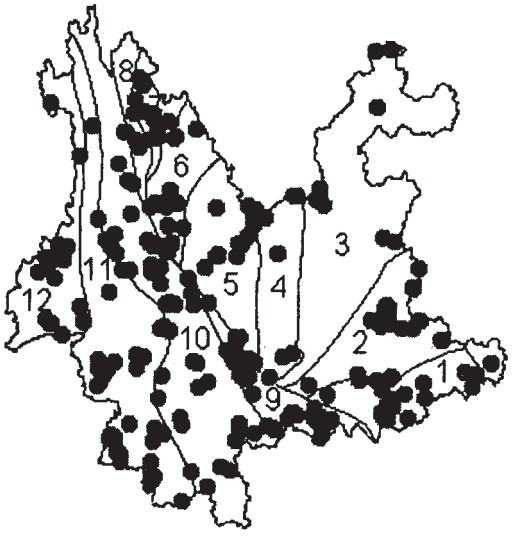


图 1　云南省金矿与金成矿分带示意图

Fig. 1　Gold deposits and metallogenic zoned map of Yunnan Province

①－金构造成矿带及编号;● －金矿床(化)点

2　金矿床密度分形分布

根据 Mandelbrod 的研究，分形尘埃分布服从下述定律：

$$d(r) = K r^{D-2} \qquad (2)$$

该公式称为概率密度函数，式中 $d(r)$ 是给定范围内的点密度，r 为给定的范围，K 为常数，D 为分维。在本研究中，利用 Mapinfo 缓冲区功能，在建立的云南金矿空间数据库中，分别给每个矿床以不同的半径 r_i 建立缓冲区，利用其查询功能得到缓冲区内金矿的矿点密度 $d(r_i)$，把各组结果的 $d(r)$、r 的对数值进行线性拟和，其斜率 $k = D - 2$，即可得到金矿密度分形分布的分维值。 其结果如图 3 所示，云南金矿床的密度服从分形分布存在两个无标度区，分维值分别为 $D_1 = 0.7164$ (2～75 km)、$D_2 = 1.4038$ (75～400 km)。

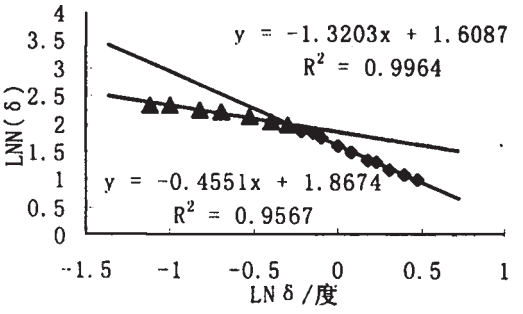


图 2　矿床数目(N)和网格边长(δ)的双对数图

Fig. 2　Relationship between LnN(t) and Lnr

3　金矿床的储量分形分布

按矿床的不同储量 t，分别统计出大于 $N(t)$ 的矿床频数 $N(t)$，在矿石密度不变的情况下，由于有 $t \backsimeq \delta^3$(δ 所考虑矿床的某个线性尺度)，根据式 (1) 可得

$$N(t) = C t^{-D/3} \qquad (3)$$

C 为常数。本次研究选取云南金矿－构造数据库金矿图层中探明 B + C + D 级储量> 0.03 吨的矿床进行统计，并对 $N(t)$ 和 t 的对数中拟和程度好的中间部分数据进行线性拟和 ($R^2 = 0.9801$)，得到如图 4 所示结果。云南金矿储量分形的分维值为 $D = -3K = 1.5699$。从结果看，图的上部和下部的点都对直线有较大的偏移。上部的点偏移可能因为储量小的矿床不受重视，统计时容易遗漏；同时根据矿床发现规律，一个地区的大部分大中型矿床总是被先发现，随后一些散布在周围小型矿床陆续被发现，因此可能和一些小矿床未被发现有关。下部的点代表较大型的矿床分布，它的偏移是否暗示还有较大金矿床未被发现，还有待进一步研究。根据上图所示的拟和公式，进行积分可计算各种规模矿床的储量，计算结果见表 2。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

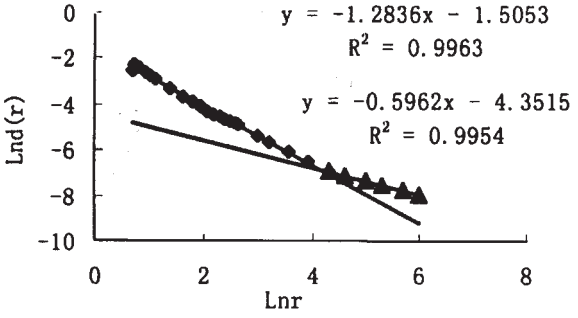


图 3 云南金矿密度 d(r)和区域半径 r 的双对数图

Fig. 3 Relationship between Lnd(t) and Lnr

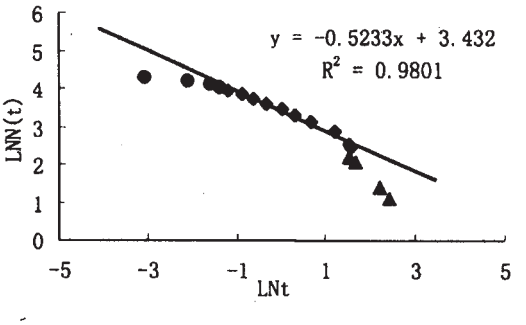


图 4 矿床频数(N)和储量(t)的双对数图

Fig. 4 Relationship between LnN(t) and Lnr

表 2 云南现有金矿含量与预测储量比较

Table 2 The known and potential gold resources in Yunnan Province

预测矿床数(个)	预测储量(t)	现有储量(t)	现有矿床数(个)
60	0.03 - 0.1	0.03 - 0.1	6
59	0.1 - 1	0.1 - 1	36
17	1 - 5	1 - 5	21
4	5 - 10	5 - 10	8
1	10.93496144		
1	13.50716305	11.4	1
1	17.06025901	17.954	1
1	22.14956423	21.07	1
1	29.77860417		
1	41.90751374	44.791	1
1	62.77650424		
1	102.9433203		
1	194.7712635		
1	478.4440491		
	<102t 预测总储量	现有总储量	
	390.55	211.81	

4 断层构造 R/S 分析

为了研究一个区域的地质现象分形的空间分布状况,需要把该区域分成许多小区,然后利用前面提到的数盒子法分区求其盒分维值,再观察分布规律。这种方法计算量很大,而编程算法较为复杂。本文选择 R/S 分析进行地质现象空间分布规律的分形研究。R/S 分析是赫斯特(Hurst H E)于 1965 年提出了一种时间序列分析方法,该方法简单实用,在分析理论中已得到许多应用,基本原理如下:

考虑一个时间序列 $\{\xi(t)\}$, $t=1, 2, \cdots$, 定义其均值、累积离差、极差、标准差分别为

$$\langle\xi\rangle_\tau = 1/\tau \sum \xi(t) \qquad \tau = 1, 2, \cdots \quad (4)$$

$$X(t, \tau) = \sum(\xi(t) - \langle\xi\rangle_\tau) \qquad 1 \leqslant t \leqslant \tau \quad (5)$$

$$R(\tau) = \mathrm{Max}\, X(t, \tau) - \mathrm{Min}\, X(t, \tau) \quad (6)$$

$$S(\tau) = (1/\tau \Sigma(\xi(t) - \langle\xi\rangle_\tau)^2)^{1/2} \quad (7)$$

记 $R(\tau)/S(\tau) = R/S$,则有统计关系式

$$R/S \propto (\pi\tau/2)^H \quad (8)$$

这里 H 称为赫斯特指数。赫斯特在研究了许多自然现象后,发现 $H > 0.5$ 时,意味着持久性,即所研究的时间序列是相关的,连续变化的,过去的一个增长趋势意味着将来的一个增长趋势;而当 $H < 0.5$ 时,过程具有反持久性、不连续性。从分形角度理解,H 可以认为是极差,标准差结构的分维,且 H 值与 R/S 的盒子维数有 $D = 2 - H$ 关系。由于空间序列可看作时间的复杂函数,把 R/S 分析的概念推广空间序列的分析是适宜的,这时 H 值表示了地质现象空间分布的自相关及连续性程度,H 值越大,地质现象的空间连续性越高;H 值越小,地质现象的空间不连续性越高,地质现象越复杂。空间不连续程度是一种复杂性的表现,因此可以用 H 来定量描述空间复杂度和寻找表示研究对象所必须的变量数。

本研究中数据大部分取自金矿 - 构造数据库中 1:100 万云南断层图层,并补充了四川及贵州的小部分数据,研究区在北纬 23.1 ~ 28.425 度,东经 99.15 ~ 104.4 度之间,包括云南大部分及四川南部、贵州西部一小部分。具体操作步骤如下:

(1) 使用 Mapinfo 提供的网格划分功能,以 8km 为半径划分正方形网格 71 × 70 = 4970 个。

(2) 使用分割命令,以断层做目标,以网格做剪切器分割断层。

(3) 使用数据库查询、更新功能,得到每个网格内断层的总长或单位密度,把每一行(列)作为一个空间序列。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(4)使用 Mapinfo 配套语言 Mapbasic 进行编程,每个序列的 $Lg(R/S)$ 与 $Lg\tau$ 数据对。

(5) 使用 Mapinfo 数据库与其他数据库的链接功能,把数据对输入 Excel 或其他相似软件,对每一行 列)数据对进行线性拟和 典型的,如图 5、6 所示),其斜率即为赫斯特指数 H,表 3 为所得结果。

(6) 把所得赫斯特指数重新输入地理信息系统进行所需空间分析。

对表 3 进行统计得,行赫斯特指数:平均为 0.7795,方差为 0.013,极差为 0.4435;列赫斯特指数:平均为 0.7595,方差为 0.0156,极差为 0.6126。行赫斯特指数和列赫斯特指数相差不大,两者的方差与极差都很小,数据非常集中,表明在南北和东西方向上断层复杂性变化不大。把行 列)数据平均分为七组,得到如图 7、8 所示频数图,行赫斯特指数只有一个峰,集中分布于中部,而列赫斯特指数出现两个峰,在东西方向上可能有两个复杂性相差较大的系统。把数据输入地理信息系统,利用它的可视化功能,可以直观的表现空间分布。图 9 显示了行和列赫斯特指数大于和小于平均值的空间分布情况,在本研究区断层的赫斯特指数的空间分布表现出一定程度的分带性规律,其中在研究区北部赫斯特指数有低—高—低—高—低的规律表现最为明显,断层的复杂性有高—低—高—低—高的规律 在东西方向上赫斯特指数总体有低—高—低—高的规律,断层的复杂性则高—低—高—低。

人们希望根据自相似分形 (即单分形或简单分形)就可由局部信息代替整体 ,或从某一尺度下的特征外推至另一尺度下的特征。然而客观世界是极其复杂的 ,分形也不例外。单分形在自然界中是极

表 3　云南分行(列)赫斯特指数表

Table 3　The values of H index of rowing and lining in Yunnan Province

序号	行	列	序号	行	列	序号	行	列	序号	行	列
1	0.7139	0.7389	19	0.6228	0.7954	37	0.8801	0.747	55	0.9056	0.767
2	0.7533	0.7042	20	0.7559	0.7613	38	0.9101	0.837	56	0.7507	0.87
3	0.7655	0.7363	21	0.6061	0.7633	39	0.8884	0.787	57	0.7243	0.807
4	0.628	0.516	22	0.5698	0.7342	40	0.8286	0.721	58	0.8816	0.761
5	0.6217	0.7928	23	0.8375	0.5668	41	0.7585	0.701	59	0.8495	0.962
6	0.636	0.738	24	0.5706	0.6954	42	0.5621	0.935	60	0.7679	0.938
7	0.6864	0.67	25	0.6169	0.6927	43	0.7145	0.806	61	0.7583	1.047
8	0.8728	0.8563	26	0.7536	0.7762	44	0.6575	0.522	62	0.7464	0.659
9	0.8354	0.6975	27	0.9307	0.7795	45	0.7861	0.703	63	0.62	0.65
10	0.8679	0.5528	28	0.9829	0.8809	46	0.6101	0.863	64	0.6294	0.674
11	1.005	0.6074	29	0.9024	0.8478	47	0.981	0.816	65	0.7556	0.765
12	0.8489	0.8713	30	0.9093	0.8789	48	0.7574	0.456	66	0.8642	0.996
13	0.8264	0.7281	31	0.7679	0.78	49	0.7565	0.567	67	0.9062	0.955
14	0.896	0.6942	32	0.8154	0.6038	50	0.7262	0.754	68	0.6828	0.993
15	0.818	0.7513	33	0.6681	0.5387	51	0.7709	0.718	69	0.7646	0.849
16	0.958	0.6156	34	0.8877	0.6348	52	0.7576	0.724	70	0.7071	1.068
17	0.8773	0.7522	35	0.9959	0.7958	53	0.8131	0.85	71	0.8638	
18	0.5615	0.8434	36	0.8504	0.8092	54	0.7894	0.699			

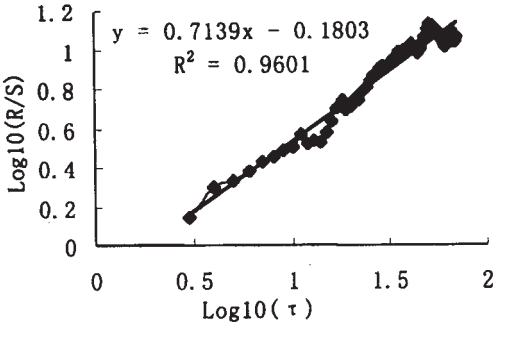


图 5　第一行双对数图

Fig. 5　Relationship between Log(R/S) and Lnr

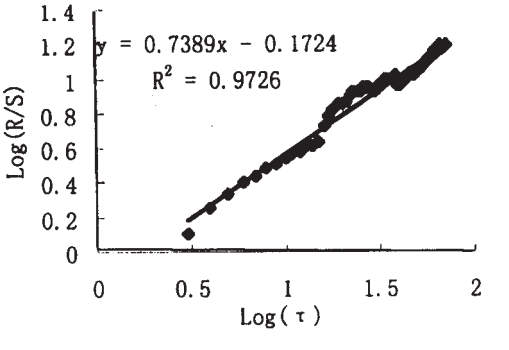


图 6　第一列双对数图

Fig. 6　Relationship between Log(R/S) and Lnr

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

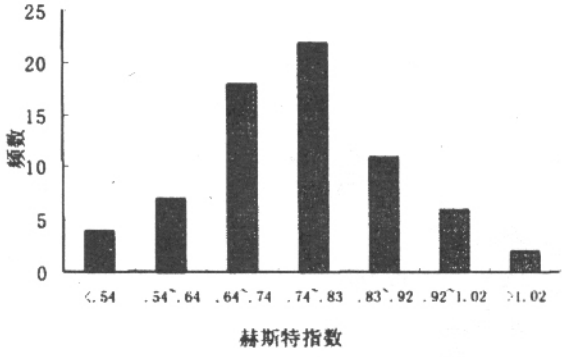


图 7 行赫斯特指数频数图

Fig. 7 Frequency of H of rows

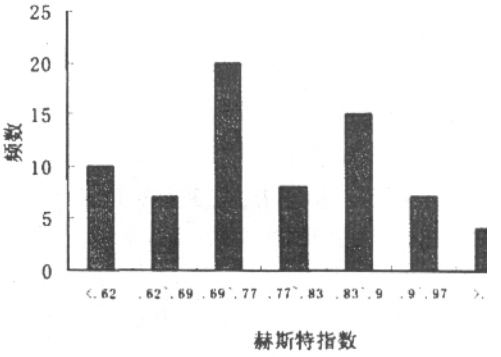


图 8 列赫斯特指数频数图

Fig. 8 Frequency of H of rows

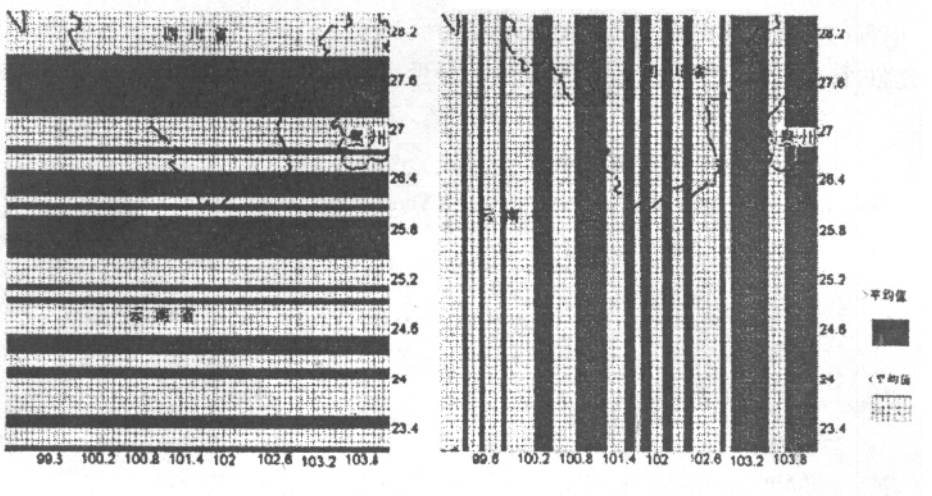


图 9 行、列 H 值空间分布图

Fig. 9 Spatial distribution of the H of rows and lines

由图可知无标度范围主要集中在 6 ~ 14 格，即实际距离约 50 ~ 112 km。由分行得到的范围中，最大值 36，最小值 4，总平均值 12. 14 格；范围小于 14 格的无标度区总计 212 个，占总数的 74. 56%，平均 9. 31 格; 范围大于 14 格的 72 个，占总数的 25. 44%，平均 20. 49 格，约为小于 14 格无标度区平均值的 2. 2 倍。同样的，由分列得到的范围中，最大值 36，最小值 4，总平均为 12. 40 格；范围小于 14 格的无标度区总计 223 个，占总数的 74. 33%，平均 9. 87 格; 范围大于 14 格的 77 个，占总数的 25. 67% 平均 19. 74 格，约为小于 14 格无标度区平均值的 2. 0 倍。据此认为对于行和列，范围大于 14 格的无标度区，并非真正的无标度区，而是没有区分出的二或三个无标度区。分别去除范围大于 14 格的无标度区，得到行和列的各无标度区区间的平均值如表 4 所示，由表可知，根据行和列的双对数图上的间断点都可以将研究区分别区分出六个明显的无标度区，无标度区范围约在 8 ~ 11 格之间，实际距离为 65 ~ 90 km。利用地理信息系统，可以很方便的将各间断点标绘在由步骤（）产生的网格图上，连接各间断点后形成无标度分界线（如图 12），直观的表示出各区间的空间分布。如图所示，南北向和东西向的分界线把研究区分成了若干（65 ~ 85） km × (74 ~ 90) km，平均约 80 km × 80 km 的相对独立的单元。因此

少存在的，通常在地理学和地质学领域内用对数图所发现的标度不变性实际上说明这个过程是个多重分形，是相互关联着的、空间上相互缠绕的若干局域分形系统组成的更高一级系统，每一个局域系统构成一个相对独立的无标度区间。Mark 和 Aronson（984）的研究也表明对于区域化变量在不同的标度范围内有不同的局域分维数，而且两个相邻标度范围的分界点（或叫标度间断点）具有重要的地学意义。标度间断点可以直接从双对数拟和图观察得到，如图 5、6 所示，点迹顺着趋势线上升，到特定点后开始变的和缓甚至下降，然后又开始上升，这些点就是标度间断点，表示着前一局域分形系统正在被破坏然后被另一局域分形系统所重建、代替。从行和列的双对数图上分别得到 284、300 个标度间断点，同一行（或列）的间断点之间的距离即为无标度区范围，统计无标度区范围得到如图 10、11 所示频数图，

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 4　无标度区范围

Table 4　Range of non-mark district

区间	第一区间		第二区间		第三区间		第四区间		第五区间		第六区间	
单位	(格)	(km)	(格)	(km)	(格)	(km)	(格)	(km)	(格)	(km)	(格)	(km)
行	8.16	65.28	9.13	73.04	9.88	79.04	10.92	87.36	10.63	85.04	9.67	77.36
列	9.8	78.4	9.29	74.32	9.68	77.44	10.41	83.28	10.72	85.76	11.2	89.76

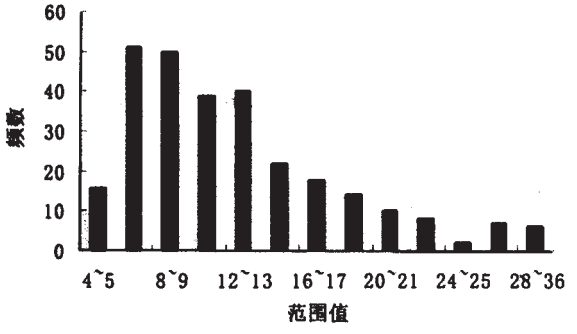


图 10　无标度区范围频数图(行)

Fig. 10　Frequency of range of non-mark zones (row)

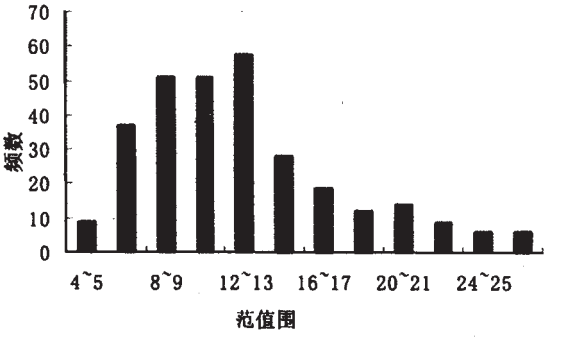


图 11　无标度区范围频数图(列)

Fig. 11　Frequency of range of non-mark zones (line)

认为云南的断层是一个由若干以 80 km × 80 km 为尺度的，网格状分布的相对独立的局域分形体系构成的系统，如前所述单元内部受统一的或单一的过程控制，与其它单元相区别；80 km × 80 km 可以作为云南进行 1∶100 万断层及各种构造的动力学机制研究的最小单元，各单元的空间分布也可为构造区划提供参考。

4　讨论与结论

(1) 云南及金构造成矿带的金矿(图 1)空间分布具有分形特征(表 1)，分为两个无标度区间。云南金矿在第一区间内，其分维值大于全国，略小于华北华南，表明在第一区间内云南金矿的丛集程度低于全国的水平，即分布更均匀些，但比华南、华北分布相对集中。第二区间和全国及其他地区相比只略高于华北地区。两个区间的分界点为 50 km，小于全国及华北、华南的 80 km，可能和研究区范围及云南构造活动复杂且密集有关。各成矿带两无标度区间的分界点有较大差别，从 20 km 到 80 km 不等，显示在不同的成矿区主要的控矿因素在尺度上有一定的差别。同时注意到在第一区间分维值小的区域(如 R1、R2、R11)，区间分界点也小；分维值较大的区域(如 R3、R5、R9、R12)，区间分界点也大。第一类说明在此区域内，在较小的金矿成矿区域里，金矿分布非常集中；而第二类区域相反。在第二区间，分维值有从西向东高(R12)到低(R11)到高(R10、R7、R6、R9)到低(R5、R4、R3、R2)再到高(R1)的相间分布规律，分维值和各成矿带所处区域大地构造背景有关，分维值越大，大地构造背景越复杂。分维值的大小反映金矿空间的集群程度，对勘查策略的制定有指导意

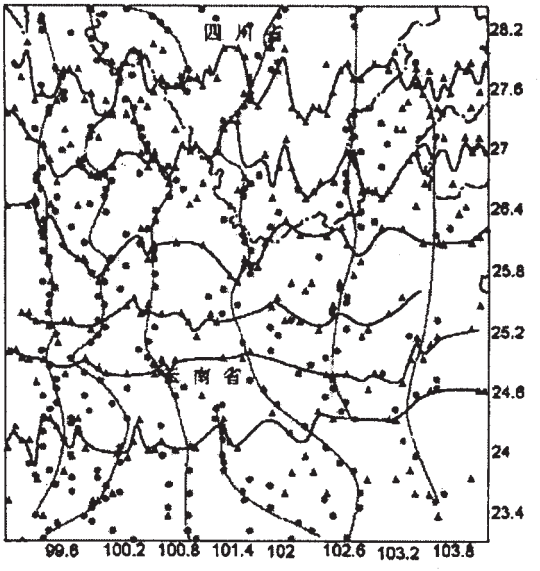


图 12　无标度区分界线图

Fig. 12　Dividing lines of non-mark district

● - 行标度间断点；▲ - 列标度间断点

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

义,在不同的区域应根据不同的无标度区间、分维值的大小制定不同的勘探策略。

(2)研究表明[1980,柳志青],矿床密度分形分布是热液以某一矿化中心向周围扩散形成的。第一无标度区间显示了热液的影响范围,第二区间反映区域地质背景的影响;分维值的大小反映热液体系内成矿物质的浓度大小。云南金矿密度分形分布(5 km,D1 = 0.7164, D2 = 1.4038)和全国(80 km, D1 = 1.2033, D2 = 1.5459)相比,热液影响范围相当,但热液中成矿物质的浓度较低。

(3) 在云南金矿的储量的分形分布的研究中比较现有储量和预测储量,认为云南还有大量未发现的金矿资源,并可能存在大型矿床。

(4)以 8 km × 8 km 为单位划分网格,以网格内断层总长度组成的行(列)空间序列作 R/S 分析,各行(列)数据序列具有式(8)的指数形式行赫斯特指数平均为 H = 0.7795,列平均为 H = 0.7595,与大多自然现象时间序列的赫斯特指数 H = 0.73 相比略高。研究区赫斯特指数在南北向和东西向都具有分带分布的特点。对标度间断点的研究表明,在南北和东西方向上都可以较明确的区分出六个无标度区,无标度区平均范围约 80 km, 由于赫斯特指数是相关性、连续的度量,因此认为标度间断点是地质现象不连续性、复杂性的转折点,在点的两边有不同的复杂度,属于不同的无标度区,有不同的力学机制。两个不同方向的标度间断线把研究区划分为约 80 km × 80 km 的单元,作者认为每一个方格代表一个相对独立的断层体系,可以作为构造动力学研究的最小单元作单独研究,对构造区划也有一定的参考价值。

(5) 充分利用地理信息系统所提供的网格划分、数据库查询、统计及数据可视化功能进行分形研究不仅简单方便,而且也更准确、精细;不仅能完成与地质现象有关的大量的空间数据获取,而且能对数据进行各种分析,并以可视化的方式把数据及分析结果直观的表达出来;不仅能完成较简单的分形分析,且借助其编程语言能完成较复杂的分形研究。

参考文献:

1967 Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. Science,156: 636 – 638.

1991 孟宪固. R/S 分析和地球化学数据的分形处理 [J]. 地球科学,16(3): 282 – 286.

1998 丁式江,翟裕生,邓军. 中国金矿床分布的分形研究[J]. 地质论评,44(2): 188 – 193.

1998 施俊法,王春宁. 中国金矿床分形分布及超大型矿床的勘察意义[J]. 地球科学,23(6): 616 – 619.

2000 连长云,苏小四. 胶东地区未发现金矿床资源总量的分形估计[J]. 长春科技大学报,30(1): 24 – 27.

2000 张湘炳,陈广浩,吴堑虹,黄怀勇. 云南省金矿构造区划及区域成矿特征[J]. 大地构造与成矿学,24(Suppl): 1 – 9.

APPLICATION ON GIS IN STUDY OF FRACTAL OF GEOLOGICAL PHENOMENON

——Taking the Study of Gold Ore Formation in Yunnan Province as an Example

ZHANG Hong-en[1,2], CHEN Guang-hao[2], HUANG Huai-yong[2]

(1. *Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing*, 100871, China; 2. *Changsha Institute of Geotectonics, Chinese Academy of Sciences, Changsha* 410013, *China*)

Abstract: GIS and fractal are all new and effective technique developed in recent years, fitting for the stuffy of geoscince. In this paper GIS is applied to analyse the fractal of gold deposits and faults, and it is proved adequate to the study of fractal and also we get some new information about the gold deposits and the faults in Yunnan Province.

Key word: GIS; Fractal; *R/S* analysis; gold deposit; fault

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net