

文章编号: 1007-4619(2007)04-0493-07

基于 RS 与分形的下庄矿田线性构造空间特征分析

李 社^{1,2}, 管太阳^{2,3}, 曹双林^{2,4}, 潘家永^{2,4}

(1 中煤航测遥感局 遥感应用研究院, 陕西 西安 710054; 2 东华理工学院 地球科学系, 江西 抚州 344000;

3 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 4 南京大学 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

摘 要: 本文基于分形理论和 RS 技术, 对遥感影像上所提取出来的线性构造信息进行定量分析、空间展布特征与轴矿富集关系的研究, 并且简要阐述线性构造遥感影像机理和断裂构造信息的解译与提取。通过研究表明, 下庄矿田断裂构造在 0.3125—5km 尺度范围内具有自相似性和分形特征, 相关系数均超过 0.98, 并且在该尺度范围内断裂构造空间展布出现两个分形关系, 在 0.3125—1km 尺度范围内分数维 $D_1 = 1.0693$, 在 1.25—4km 尺度范围内 $D_2 = 1.7469$ 。这进一步表明该区断裂构造具有多重分形分布特征。其断裂构造展布在 0.3125—1km 小尺度范围内较小的分维值 D_1 表明该区还有进一步勘探前景。

关键词: RS 分形; 分维值; 空间展布; 线性构造

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

Spatial Signature Analysis of Linear Structure Based on RS and Fractal Theory in Xiaozhuang Ore Field

LI She^{1,2}, GUAN Taiyang^{2,3}, CAO Shuanglin^{2,4}, PAN Jiayong^{2,4}

(1. Aerophotogrammetry and Remote Sensing Center of China Coal Shaanxi Xi'an 710054, China;

2. Department of Earth Sciences East China Institute of Technology Jiangxi Fuzhou 344000, China;

3. Institute of Geochemistry Chinese Academy of sciences Guizhou Guiyang 550002, China;

4. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research Nanjing University Jiangsu Nanjing 210093, China)

Abstract: Linear Structure information extracted from TM image were studied by quantitative analysis of the relation of their spatial distribution features and uranium mine concentration based on fractal theory and RS in the paper. It explained the mechanism of linear structure on TM Image and interpreted fault structures in brief. The results show that the fault structures in Xiaozhuang Ore Field have self-similarity statistically and their distributional regularity is within scale range of 0.3125—5km and all correlation coefficients exceed 0.98. It can be regarded as two fractal relation and the fractal dimension within scale range of 0.3125—1km is $D_1 = 1.0693$, within scale range 1.25—4km is $D_2 = 1.7469$. Further, It shows that fault structures have multi-fractal character in the Xiaozhuang Ore field. It indicates that the region has further perspective to explore where the structures within 0.3125—1km with minor value of fractal dimension.

Key words: remote sensing; fractal; fractal dimension; spatial distribution; linear structure

1 引 言

断裂构造是地壳变形和演化的重要产物之一, 也是一种重要的构造作用方式, 它对热液迁移和矿床的

形成、油气运移和油气藏形成、地下水迁移和废物的地下储存、地壳运动和地震等起着重要作用, 断裂构造不仅为成矿物质的活化、迁移及沉淀提供空间条件, 而且断裂构造的发育强度在一定程度上反映了地壳中流体活动的强弱。在成矿期间, 断裂分布集中的

收稿日期: 2006-05-11; 修订日期: 2006-11-26

作者简介: 李 社 (1978—), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 东华理工学院矿产普查与勘探专业毕业, 主要研究方向: 遥感地质信息提取模型。已发表论文 4 篇, E-mail: lish99112@hotmail.com.

部位往往是热液活动的中心。因此,对断裂构造空间分布特征的研究将有助于热液矿床找矿靶区的预测与评价。传统的野外地质工作,是通过点线观测的方法,研究工作区内断裂构造分布的总体构架,其局限性是显而易见的。遥感影像客观、真实、全面地记录了断裂构造形迹的总体和个体的地表几何形态及其物理特征,信息密度大且连续性好,具高度的概括性且含有大量的、地下一定深度的隐伏断裂构造的信息特征,为断裂构造空间分布研究提供了新的途径。但是,自然界的断裂构造的空间分布并非均匀,也非完全随机的。如何定量表征断裂构造分布的空间特征是断裂构造研究中的一个重要课题。

2 区域地质背景

下庄铀矿田位于广东省翁源县、始兴县、连平县、江西省全南县两省四县相毗邻的地区,矿田面积 407km^2 ,是中国最早发现的花岗岩型万吨铀矿田,也是中国铀矿重要资源基地之一。

下庄地区位于贵东岩体东段,为其组成部分。贵东岩体属纬向南岭花岗岩带组成之一。位于北纬 $24^{\circ}30' - 25^{\circ}30'$ 的九疑山—大东山—泉州花岗岩带的西段近中部。本区在区域构造上处于华夏古陆西缘,闽赣后加里东隆起的西南缘与湘桂粤北海西—印支拗陷交接部位(图 1)。

贵东岩体出露面积 1009km^2 主要受东西向大东山—漳州深大断裂控制,总的呈东西向展布。下庄地区又受北西向惠来—汝城深断裂控制,岩体向

南东偏转。其西还受 NNE 向的吴川—韶关深断裂控制,其东受恩平—新丰深断裂所控制。为此,本区是一块多组深断裂发育与交汇的独特区。这块深部构造独特区反映出下庄地区是地壳浅部地质构造急剧变化的地带。

下庄矿田位于 NEE 向黄陂断裂带和马屎山断裂带所夹持的范围内。其矿田断裂构造及其发育,按其空间展布方向可分为三大组:即 NWW, NEE 和 NNE 向,构造都按其等间距空间展布(图 1)。

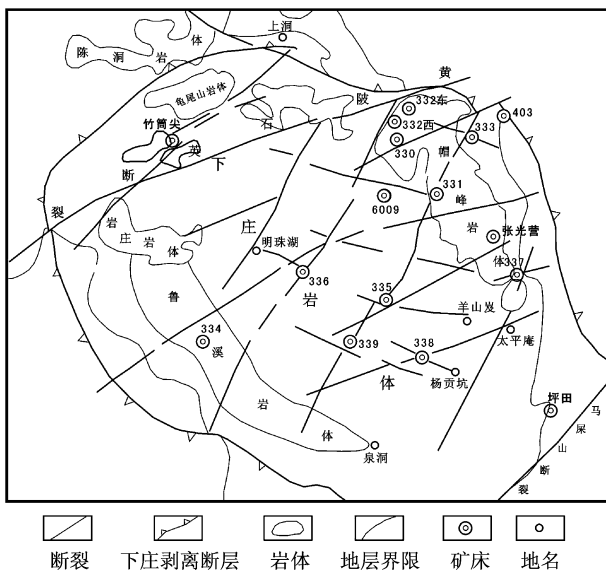
下庄矿田所处地区的地质构造应力场特征是,燕山运动早期该地区主要受主应力轴 SN 向压应力的控制,而处于挤压隆起状态,并引起强烈的区域构造运动,同时在深部构造应力场的控制下形成近 EW 向, NW 向, NE, NNE 向断裂带;燕山运动中期晚阶段以后,该地区产生拉张效应^[1],且区域地质应力场以水平拉张为主,致使本地区的区域构造运动由挤压应力场向伸展应力场转换,在下庄地区地壳浅部形成了浅层次热隆伸展构造和裂陷伸展构造与相应的断陷盆地^[2]。从华东南中生代伸展构造的分布特点上看,大致以武功山—诸广山—云开大山为界,其东部和西部分别属于华夏地块和扬子地块加里东期增生的陆壳^[3],也就是说,武功山—诸广山—云开大山一线构成了两地块的构造应力场接合部位。该接合部位正是构造上的软弱带和不连续带,是后期地壳运动的主要构造活动带。

3 断裂构造的影像机理及信息提取

本次研究以 1993 年 10 月 5 日接收的 Landsat 5 TM 数据为信息源,遥感影像灰度特征效果较好,层次感强,影像中纹理细节都有清晰的显示。下庄矿田影像基本没有积云。选用最佳波段 TM453 (RGB)合成的假彩色图像为人机交互地质解译基础图像(图 2),并选择局部增强和二维空间域定向卷积滤波处理图像作为解译的补充图像和典型图像(图 3 图 4)。

3.1 断裂构造的影像机理

在遥感影像上,断裂构造表现出其特有的个性特征而被加以识别和确定。由于受断裂构造活动的影响,断裂带本身及其旁侧在含水性、岩石成分以及结构特征等方面与其外围均存在较明显的差异,这些差异通过地物波谱异常反映出来,并在图像上显示出不同的色调、纹理结构和水系格局。这些个性



(C)19图-10下庄矿田地质略图

Fig 1 Schematic geological map in Xia Zhuang ore field

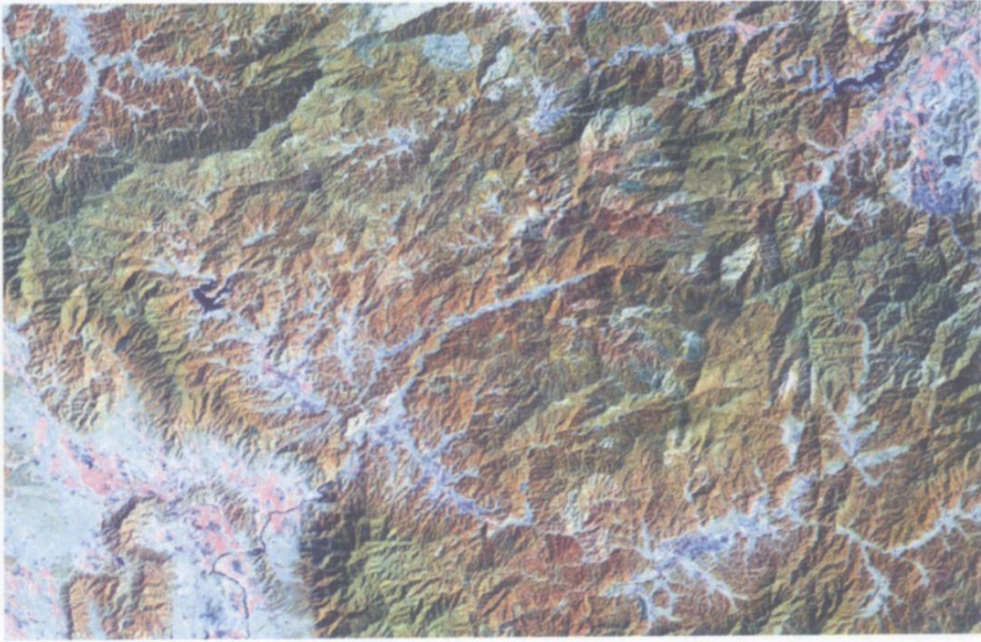


图 2 下庄矿田遥感影像 TM 4, 5, 3(RGB)

Fig 2 TM image in ore field of Xiaozhuang(TM 4, 5, 3)

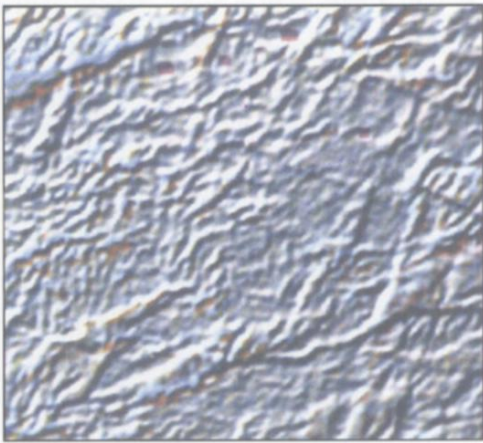


图 3 下庄矿田卷积滤波处理图像

Fig 3 Image of convolution direction filtering in Xiaozhuang ore field

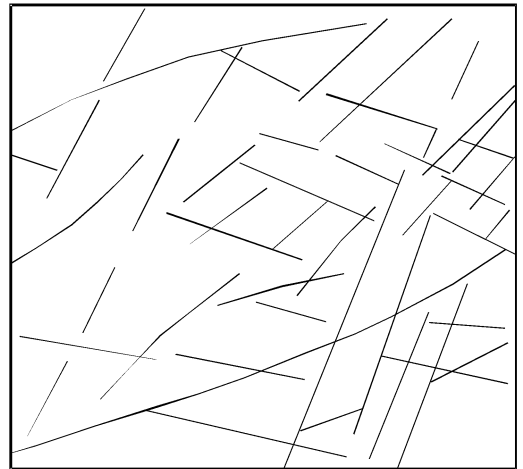


图 4 下庄矿田卷积滤波处理解译图像

Fig 4 Interpretation image of convolution direction filtering in Xiaozhuang ore field

特征便成为解译断裂构造的标志。其具体又分为几何学标志、运动学标志、动力学标志^[4]、断裂性质标志^[5]。然后,再反复通过分析其解译标志,采用“证据会聚、相互印证^[6]”的调查研究技术,结合伽马能谱数据即可识别地物的构造线。

3.2 断裂构造信息提取

断裂构造信息提取及图像处理技术中,较为有效的方法是对图像进行二维空间域定向卷积滤波处

理^[7]。其数学表达式为^[8]:

$$g(x, y) = \sum_{s=-(m-1)/2}^{(m-1)/2} \sum_{t=-(n-1)/2}^{(n-1)/2} w(s, t) f(x+s, y+t)$$

式中, $f(x+s, y+t)$, $g(x, y)$ 分别为变换前、后像元灰度值; $w(s, t)$ 是一个 $m \times n$ 矩阵, 即卷积核; m, n 为卷积核的列数和行数; x, y 是像元的采样列行号。为了消除地形、植被、黏土等因素的干扰, 在进行卷积处理之前, 先做比值图像 $P_1 = TM4/TM7$, $P_2 = TM5/TM3$, $P_3 = TM5/TM4$, 然后对 P_1, P_2, P_3 分

别做卷积滤波,最后将 3 个卷积滤波的结果文件进行 RGB(或 HS)假彩色合成(见图 3)。通过定向滤波突出不同方向的线性体断裂构造。通过对上述图像的详细解译,以及去伪存真、证据汇聚、相互印证的技术分析,编制了该区 TM 影像断裂构造解译图(图 5)。

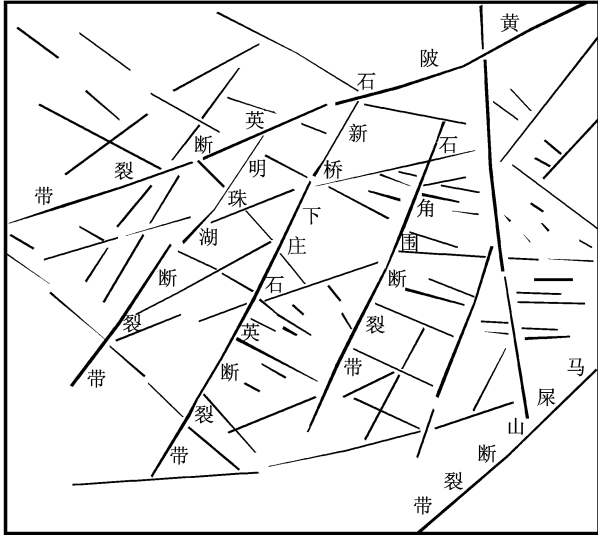


图 5 下庄铀矿田 TM 影像断裂构造解译图

Fig 5 Interpretation map of fault of TM data in Xiazhuang ore field

4 下庄矿田断裂构造空间分形特征

运用数理统计方法,对遥感影像上所提取出来的断裂构造信息进行定量分析,是目前较为流行也是较为实用的一种方法。

4.1 分形理论简述

20 世纪 60 年代,英国《科学》杂志刊载了 B. B. Mandelbrot 的文章——英国的海岸线有多长?从而引出了分形的概念,实现了把某些类型的非整数维应用于工程技术上的设想^[9]。众所周知,断裂构造的空间展布是一系列无规则的线状或面状集合体,这是传统的欧氏空间几何学所无法精确描述的。研究表明^[10],断裂破裂过程也具有分形结构特征,即断裂的空间展布所具有的分形结构使其被定量描述成为可能。将断裂构造视为分形体,运用分形理论的方法可以计算出断裂空间分布的分数维值。其分数维计算方法如下。

B. B. Mandelbrot 把分形定义为:其组成部分与整体存在一定的自相似性,用分维值 D 来定量描述

分形的复杂程度。可以定义一个分形模型:

$$N_i = C/r_i^D \quad (1)$$

式中, N_i 为具有指定特征的物体数目; r_i 为特征物体的标度; D 为分维; C 为比例常数。

对 (1) 式两边取对数:

$$\lg N_i = \lg C - D \lg r_i \quad (2)$$

由 (2) 式可知, $\lg N_i$ 与 $\lg r_i$ 呈线性关系,分维值 D 是直线斜率的绝对值。根据分维定义和 (1) 式,设计一个数学模型,从而求出分维值 D ^[11]。求分数维的方法有多种,本文采用盒计维数的统计方法测定下庄矿田断裂构造的分维 D 值。该法的基本步骤为:用不同边长为 r_i 的离散化的小正方形网格覆盖下庄矿田域,统计相应的 N_i ,以 $\lg r_i$ 为横坐标, $\lg N_i$ 为纵坐标,在双对数坐标系中采用最小二乘法对统计数据进行分析,如果该下庄矿田域具有自相似性分形结构特征,那么 $\lg N_i$ 与 $\lg r_i$ 应满足 $D = |\Delta \lg N_i / \Delta \lg r_i|$ 的线性关系。

4.2 断裂构造空间分形特征

研究中采用断裂构造图 5。测量中采用了 20 个单元尺度, r 分别从 0.3125 km 到 4 km 的尺度范围。然后,利用 ArcView GIS 的空间分析模块^[12] (Spatial Analyst) 分别统计出有断裂构造进入的网格数 N_i (表 1),并在双对数坐标系中对统计数据进行分析拟合(图 6)。可以看出,良好的线性拟合关系反映了该区断裂构造空间展布的统计自相似性特征,即断裂构造空间展布的分形特征。由最小二乘法求得分维值 $D = 1.2860$, 相关系数为 0.9865。说明下庄矿田断裂构造的空间展布很好地遵从幂律关系式 (1), 回归曲线如图 6 所示。

表 1 断裂构造统计数据

Table 1 Statistical data of fault

尺度 r/km	网格数 N_i	尺度 r/km	网格数 N_i
4.0	42	1.5	231
3.75	48	1.25	328
3.5	55	1.0	456
3.25	66	0.75	708
3.0	67	0.5	1182
2.75	85	0.25	2528
2.5	100	0.125	5037
2.25	122	0.1	6270
2.0	143	0.625	9921
1.75	191	0.3125	19653

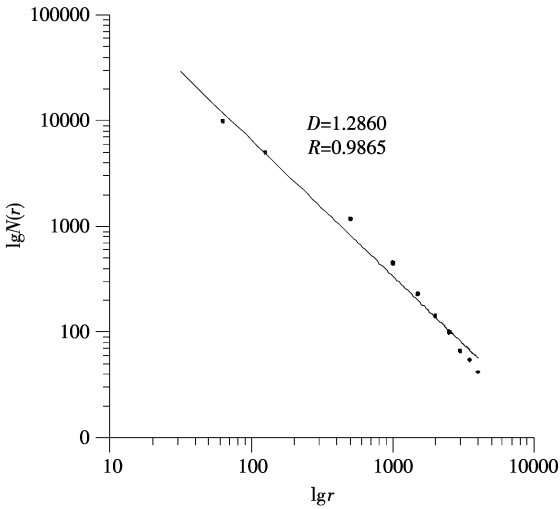


图 6 下庄矿田全区断裂构造空间特征分布盒维数曲线

Fig 6 Hausdorff dimension of distribution feature of fault in Xiazhuang ore field

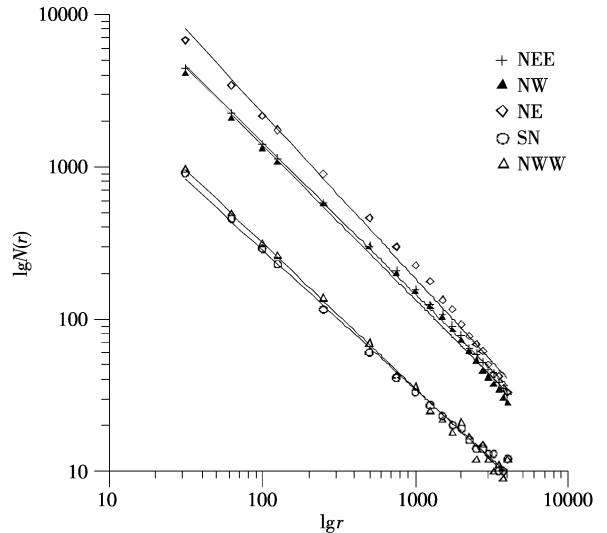


图 7 下庄矿田不同走向断裂构造空间特征分布盒维数曲线

Fig 7 Hausdorff dimension of distribution feature of difference strike fault in Xiazhuang ore field

为进一步研究该区断裂构造空间展布的复杂性,以明珠湖断裂构造组为界,以西为成矿构造活动 A 区;以明珠湖断裂构造以东至太平庵断裂构造以西夹持区为成矿构造活动 B 区;太平庵以东,为成矿构造活动 C 区。利用 ArcView GIS 的空间分析模块 (Spatial Analyst) 分别统计各成矿构造活动区* 和不同走向断裂构造不同尺度下的网格数,求得其对应的分维值 D (表 2), 关系曲线如图 7 和图 8 所示。

表 2 下庄矿田全区、分区和不同走向断裂构造分维值
Table 2 Value of dimension of difference strike fault sub-area and area in Xiazhuang ore field

断裂	分维值	相关系数
全区	1.2860	0.9965
A 区	1.3997	0.9973
B 区	1.5354	0.9948
C 区	1.1240	0.9997
NW	1.1142	0.9958
NEE	1.0997	0.9982
NE	1.1916	0.9929
SN	1.0171	0.9969
NWW	1.0576	0.9945

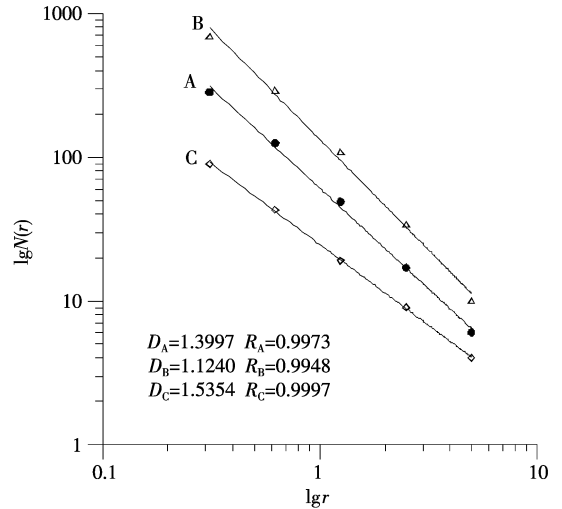


图 8 A、B、C 区断裂构造空间特征分布盒维数曲线

Fig 8 Hausdorff dimension of distribution feature of fault in the A、B、C region of Xiazhuang ore field

进一步分析下庄矿田断裂构造空间展布盒维数曲线 (图 9) 发现, 数据点分布具有明显的曲率, 深入分析得知这些点具有两个直线关系, 在 0.3125—1km 尺度范围内分维值 $D_1 = 1.0693$, 在 1.25—4km

尺度范围内分维值 $D_2 = 1.7469$, 这说明下庄矿田断裂构造的空间展布在 0.3125—5km 尺度范围内具有两个分形关系, 这进一步表明下庄矿田断裂构造具有多重分形分布特征。

由表 3 可知, 断裂构造空间展布的复杂程度与其分维值大小成正相关, 成矿构造活动 B 区分维值最大, 相对应的断裂构造空间展布的复杂程度最高; 次之构造活动 A 区分维值较小, 其相对应的断裂构造空间展布的复杂程度也较之 B 区低; 成矿构造活动 C 区分维值最小, 其相对应的断裂构造复杂程度

* 广东省核工业地质局 293 大队·广东省翁源县下庄矿田超富铀矿成矿机理及定位研究·2001.

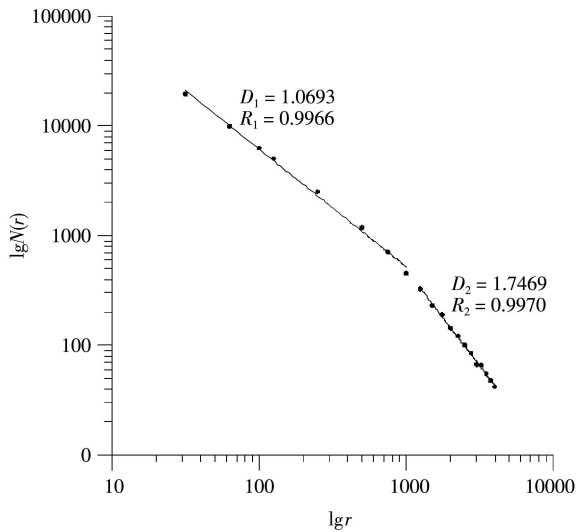


图 9 下庄矿田盒维数曲线分析

Fig 9 Tracing analysis of hausdorff dimension in ore field of Xiazhuang

也最低。相关系数均达到 0.99 以上,表明矿床(点)与断裂构造在该尺度范围内具有分形结构特征。

4.3 结果分析与探讨

断裂在空间上的复杂程度是因地球动力过程引起的断裂几何学上的变化^[13]。因此,断裂构造的分

形结构特征与断裂的发育演化有关,其分维值的大小是断层数量、规模、组合方式及动力学机制的综合体现。因此,分维值可作为断裂构造发育成熟度和复杂程度的一项综合性反映指标^[14]。从表 2 可知:分维值 $D_B > D_A > D_C$,反映了成矿构造活动中区的断裂构造,较之西区和东区断裂构造在空间展布、规模以及控矿程度(见表 3)上复杂的特点。分维值 $D_{NE} > D_{NW} > D_{NEE} > D_{NWW} > D_{SN}$,表明 NE 向断裂构造最为发育, NW 向断裂构造发育次之, NEE 向断裂构造较发育, NWW 和 SN 向断裂相对其他走向断裂构造不发育。这一结论正好与下庄矿田断裂构造空间展布相一致。

各成矿构造活动区和不同走向断裂构造的分维值的差异,表征了不同区域断裂构造空间展布在分形几何特征上的差异,同时也反映了下庄矿田在地质演化过程中构造作用所产生的断裂在时空上的一种不平衡性和非均匀性。研究表明,断裂构造体系时空上的这种不平衡性和非均匀性,与铀矿床的分布有着相当密切的内在联系。下庄矿田铀矿床分布的分形研究结果表明(见表 3),各成矿构造活动区铀矿床分布的分维值与断裂构造的分维值呈正相关,即断裂构造分维值大的区域其铀矿床空间分布的分维值也大,铀矿产出数量较多、规模较大、分布较均匀;反之,则相反。

表 3 断裂构造空间展布、矿床(点)与分维值对比

Table 3 Contrast of dimension value and distribution feature of fault

区域	断裂构造	分维值(构造)	相关系数	铀矿床(点)数	分维值(矿床)	相关系数
A 区	明珠湖、2号、黄陂、龟尾山等断裂构造展布区	1.40	0.9973	0.833	0.59	0.997
B 区	新桥一下庄、102-石角围、张光营-仙人嶂断裂构造展布区	1.54	0.9948	0.925	0.75	0.990
C 区	太平庵、坪田断裂构造展布区	1.12	0.9997	0.417	0.42	0.994

断裂构造分维值的大小显示了断裂构造的发育成熟度和复杂程度。分维值大的区域,常是应力释放、断裂发育的地段,从而为成矿流体的运移、聚集提供了有利的运移通道和汇聚场所。成矿流体沿着断裂构造带(面)上升,在浅部的构造有利部位聚集成矿。在下庄矿田与成矿作用有关的 NE 向断裂极为发育,相应地,新桥一下庄断裂成矿带矿床数量及规模也较其他成矿带大。从以上分析可知:铀矿床的定位、产出及成矿流体的运移与断裂构造存在着一定的内在耦合,断裂构造分维值的大小可定量地描述这一特征,即断裂构造的分维值可指示矿床定

位及成矿流体运移的条件,分维值愈大愈有利于成矿流体的运移、聚集以及超大型铀矿床的形成。

5 结论

(1) 下庄矿田断裂构造在 0.3125—5 km 尺度范围内具有自相似性和分形特征,相关系数均超过 0.99。下庄矿田断裂构造空间展布在 0.3125—5 km 尺度范围内出现两个分形关系,在 0.3125—1 km 尺度范围内分维值 $D_1 = 1.0693$,在 1.25—4 km 尺度范围内 $D_2 = 1.7469$ 。这进一步表明该区断裂构造具

有多重分形分布特征。其断裂构造展布在0.3125—1km小尺度范围内还有进一步勘探前景。

(2) 断裂构造分维相对高值区与铀矿床分布密集区存在着一致性。各成矿构造活动区铀矿床空间分布的分维值与断裂构造分维值呈正相关性。

(3) 断裂构造的分维值可以定量描述断裂分布的复杂性和构造演化的成熟度,它是断层数量、规模、发育程度、组合方式及动力学的综合体现。然而,断裂构造又对成矿流体的运移、聚集以及铀矿床的空间分布起着重要的控制作用,因此,分形理论为地学工作者今后研究断裂构造提供了量化的技术手段。

致谢 本文在成文过程中得到了东华理工学院地球科学系林子瑜老师、刘建军研究生和广东核工业地质局293大队的大力帮助,在此表示衷心感谢!

参考文献 (References)

[1] Guo L Z, Shi Y S, Ma R S. The Tectonic Framework and Crustal Evolution of Southern China [M]. Tectonic Geology and Geological Mechanics. Beijing: Geological Publishing House, 1980. [郭令智,施央申,马瑞士. 华南大地构造格架和地壳演化[M]. 北京:地质出版社, 1980.]

[2] Ding R Q, Liang T X. Preliminary Discussion on Tectonic-magmatic Evolution with Respect to Metallogenesis of Rich Uranium Deposits in Xiaozhuang Ore-field [J]. Uranium Geology, 2003, 19(1): 22-25. [丁瑞钦,梁天锡. 下庄矿田构造岩浆演化与富铀成矿作用初探[J]. 铀矿地质, 2003, 19(1): 22-25.]

[3] Wang H N, Zhang S Y, Yu S J et al. Geology of Ductile-Shear Zone Type Gold Deposits in the Cathaysia Block [M]. Beijing: Science Press, 1992. [王鹤年,张守韵,俞受鏊等. 华夏地块韧性剪切带型金矿地质[M]. 北京:科学出版社, 1992.]

[4] Du G Y, Wang Z H, Li X Y. Analysis System and Mark for Tectonic Geomorphology [J]. Yantai Normal University Journal

(Natural Science), 2002, 18(2): 106-110. [杜国云,王竹华,李晓燕. 构造地貌分析体系及相关的构造地貌标志[J]. 烟台师范学院学报(自然科学版), 2002, 18(2): 106-110.]

[5] Xie G L. China Active Rift Sensor Information Analysis [M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 2000. [谢广林. 中国活动断裂遥感信息分析[M]. 北京:地震出版社, 2000.]

[6] Zhu L P. Robot Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. [朱亮璞. 遥感地质学[M]. 北京:地质出版社, 1999.]

[7] Huang Y. Template Construction and Processing Method for Extract Multi-direction Lineaments [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 1998, 21(2): 144-146. [黄毅. 多方向性特征提取的模板构造及处理方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1998, 21(2): 144-146.]

[8] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods 著. 阮秋琦,阮宇智等译. 数字图像处理(第二版) [M]. 北京:电子工业出版社, 2003.

[9] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry to Nature [M]. New York: W H Freeman and Company, 1983.

[10] Okubo P G, Akik. Fractal Geometry in the San Andreas Fault System [J]. JGR, 1987, 92(4): 345-355.

[11] Zeng W Q, Liu S Y. Version. Fractal Geometry and Its Applications [M]. Shenyang: Northeastern University's Publishing House, 1991. [曾文曲,刘世耀译. 分形几何数学基础及其应用[M]. 沈阳:东北大学出版社, 1991.]

[12] Zhu X H, Zha Y. Application of Mapinfo and Arcview GIS in Calculating Fractal Dimensions of Lines [J]. Journal of Geomatics, 2002, 27(5): 4-5. [朱晓华,查勇. MapInfo与ArcView GIS软件在线体分形分析中的应用[J]. 测绘信息与工程, 2002, 27(5): 4-5.]

[13] Sigit Sukmono, Zen M T, Kadir W G A, et al. Fractal Geometry of the Sumatra Active fault System and Its Geodynamical Implications [J]. Geodynamics, 1996, 22(1): 1-9.

[14] Xu Z B, Wang J Y, Zhang D S et al. Fractal Dimension Description of Complexity of Fault Network in Coal Mines [J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(4): 358-363. [徐志斌,王继尧,张大顺等. 煤矿断层网络复杂程度的分维描述[J]. 煤炭学报, 1996, 21(4): 358-363.]