

九万大山地区断裂构造分形特征及其地质意义

成永生^{1,2,3}

(1.中南大学信息物理工程学院,湖南长沙 410083;2.广西华锡集团股份有限公司,广西柳州 545006;
3.中南大学资源与安全工程学院,湖南长沙 410083)

摘要:本文借助于陆地卫星多波段卫星遥感影像,对九万大山地区断裂构造进行了综合解译,结合区域地质背景,基于分形几何学的理论基础,对遥感解译断裂构造进行了定量化研究。结果显示,九万大山地区断裂构造的分维值较高,显示断裂带结构复杂、构造活动强烈;元宝山子区断裂构造分维值明显偏低,其中北东向断裂构造的分维值大于北西向断裂构造的分维值,说明区内以北东向断裂构造为主,属主导性断裂构造,这恰好与区域构造特征相吻合。

关键词:分形;断裂;地质解译;遥感;九万大山

中图分类号:P542⁺.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2010)01-0127-07

自 20 世纪 70 年代美国数学家 Mandelbrot 创立分形几何学理论以来,为定量描述自然界中不规则及复杂现象提供了有效工具,使人们能够借助于事物内部的自相似性来洞察隐藏在混乱现象中的精细结构,为人们从局部认识整体,从有限认识无限提供了新的方法论,为不同领域发现规律性提供崭新的语言和定量的描述^[1-5]。分形理论已在地质领域得到了广泛应用,尤其是在地质灾害^[6]、成矿预测^[7]、大地构造分析^[8-9]、成矿动力学^[10]、地球化学^[11]等方面。断裂作为构造变形和地壳演化的重要产物之一,是自然界非常普遍的地质现象,也是一种重要的构造作用方式,具有明显的分形结构特征,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。笔者以遥感解译的九万大山地区的断裂构造为基础,利用分形几何学方法,对断裂体系进行了分形分析研究,结合研究区地质特征,进一步探讨了断裂构造分形的地质意义。

1 断裂构造分形理论基础

分形是指其组成部分以某种方式与整体相似的

形^[12]。它是以分维数、自相似性、统计自相似性和幂函数等为工具,研究不具有特征标度、极不规则和高度分割但具有自相似性的复杂现象,定量描述这种自相似性的参数称为“分形数”或简称“分维”,记为 D ,它可以是分数。

Mandelbrot 认为分数维乃分形理论的核心,定义为:“一个集合,如果其 Hausdorff 维严格大于其拓扑维,则称该集合为分形集”。分形维数扩展了整数维的概念,但同时又包含了整数维。测定分维数的常用方法有:①改变观察尺度求维数;②根据测度关系求维数;③根据相关函数求维数;④根据分布函数求维数;⑤根据频谱求维数^[2]。

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,这是传统的欧氏几何学无法精确描述的。断裂破裂过程具有随机自相似性,断裂的分布和几何形态具有分形结构特征。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,按照分形几何学的方法可以求得断裂空间分布的分维值^[13]。分维值 D 的大小反映了断裂构造展布结构的复杂程度、构造活动的强弱及构造发育的程度。 D 值越大,其展布结构越复杂,构造

表 1 九万大山区带 $r-M(r)$ 统计

Table 1 $r-M(r)$ statistics of Jiuwandashan area

r/km	40	20	10	5	2.5
$M(r)/\text{个}$	14	45	153	507	1639

从表 1 中可以看出,正方形网格越大含有断裂构造的盒子数就越少,而正方形边长越小含有断裂构造的盒子数就越多,随着正方形边长的减小,盒子总数呈几何倍数增长。根据盒维数法,以 $\lg(r)$ 为横坐标, $\lg M(r)$ 为纵坐标,在双对数坐标中用最小二乘法对统计数据进行分析(图 2),可以看出断裂构造 $\lg(r)-\lg M(r)$ 具有以下特点:

① $\lg(r)$ 与 $\lg M(r)$ 之间呈现出明显的线性关系,可以认为标度范围内研究区断裂构造具有良好的分形分维特征。

② $\lg(r)-\lg M(r)$ 回归直线斜率的绝对值即为断裂构造的分维值 D ,其值为 1.730。

③ 从该区断裂构造分形分维值 $D(1.730)$ 可以看出,九万大山区带断裂构造活动性强,反映了区域大地构造的复杂性。

4 元宝山子区断裂构造分形

由于地质现象是非常复杂的,同方向的断裂可

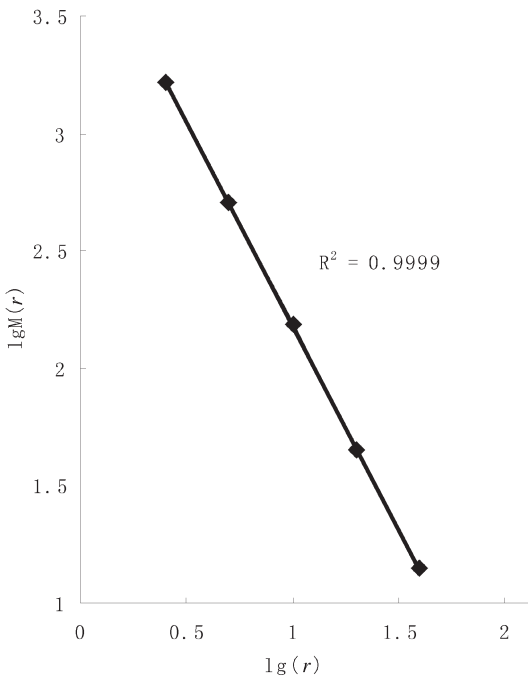


图 2 九万大山区线性构造分形分维双对数图

Fig.2 Double logarithm sketch of the linear fracture fractal in Jiuwandashan area

能不同期形成,不同方向的断裂也可能同期形成,因此应用分形理论研究断裂时,必须与地质实际相结合,严格区分断裂的时代、方向等因素^[15]。断层体系分维数值的物理意义可能与断层的规模或形成断层的能量有关^[12]。

本次另选取元宝山子区进行研究,已知该区以北东向和北西向构造为主导性构造,其不仅规模大、延伸长,而且常常控制着矿体的产出,与矿产成因关系密切。根据以上对九万大山区带断裂构造的分形研究,选取北东向和北西向断裂构造进行重点研究,以揭示整个研究区北东向和北西向断裂构造的基本特征。同样借助于分形几何中的盒维数法来揭示其分形分维特性。

将元宝山子区的遥感影像进行断裂构造解译(图 3),同样,取 $L=40 \text{ km}$ 作为基本单位长度,对元宝山子区进行离散分解,再依次取 $r=L/2, L/4, L/8, L/16$ 边长的正方形盒子对该区进行覆盖,统计在不同尺度下含有断裂构造的盒子数以及含有北东向、北西向断裂构造的盒子数(表 2),并作双对数回归曲线拟合图(图 4~6)。

5 分形结果讨论

断裂体系空间分布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,可以作为断层构造复杂程度的一个定量参数^[10]。一般而言,发育于构造活动强烈的较浅部的脆性、张扭性断裂带,断裂长度较大,小断层及分支断层繁多,带内破碎程度高,断层构造复杂,具有较大的分维值;反之,发育于构造活动较弱地区的深部的韧性、剪切断裂带,断层

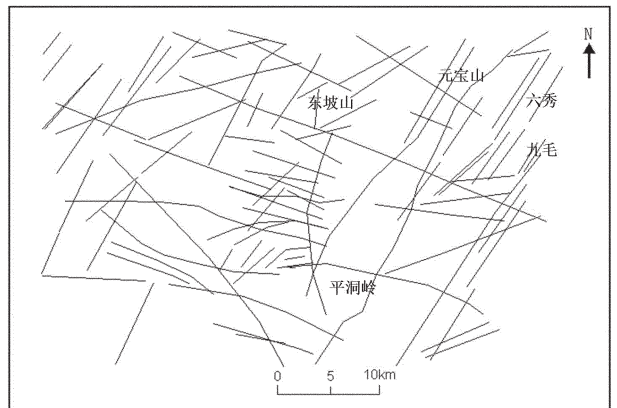


图 3 元宝山子区断裂构造解译图

Fig.3 Fracture interpretation of Yuanbaoshan area

表 2 元宝山子区断裂构造 $r-M(r)$ 对照表

Table 2 $r-M(r)$ comparison table of Yuanbaoshan area

r/km	40	20	10	5	2.5
元宝山子区	10	27	73	215	521
$M(r)$ /个					
元宝山北东向构造	8	20	53	149	375
元宝山北西向构造	7	18	41	103	223

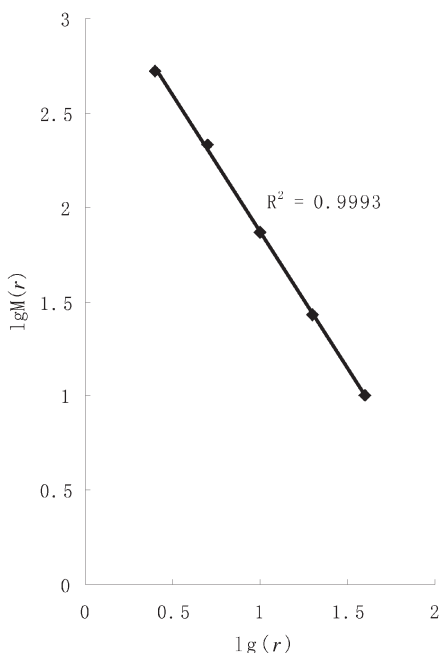


图 4 元宝山子区断裂构造分形分维双对数图
Fig.4 Double logarithm sketch of the linear fracture fractal in Yuanbaoshan area

较为稀少,小断层及分支断层也相应较少,其分维值也较小。因此,可以通过断裂分维值的研究去预测断裂分布的复杂程度^[2]。就地壳的活动性而言,在伸展构造应力场作用下,断裂尺度分布的分形维数值高的地区较分形维数值低的地区要强烈^[6]。从研究区的不同类断裂构造的分形分维值可以看出(表 3):

(1)不同研究范围内的各类断裂构造的 $lg(r)$ 与 $lgM(r)$ 之间均表现出明显的线性关系。因此,在各研究标度范围内各类断裂构造均具有良好的分形分维特征,其回归直线斜率的绝对值即为断裂构造的分维值。

(2)九万大山区带断裂构造分维值最高为 1.730,其次为元宝山地区的断裂构造分维值(1.419),但明显小于九万大山区带断裂构造分维值,元宝山地区

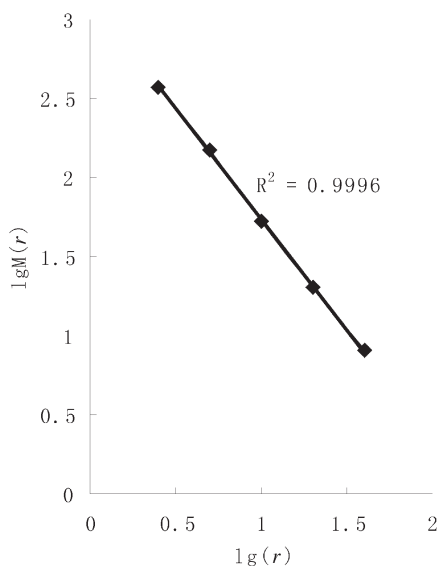


图 5 元宝山子区北东向断裂构造分形分维双对数图
Fig.5 Double logarithm sketch of the N-E trending linear fracture fractal in Yuanbaoshan area

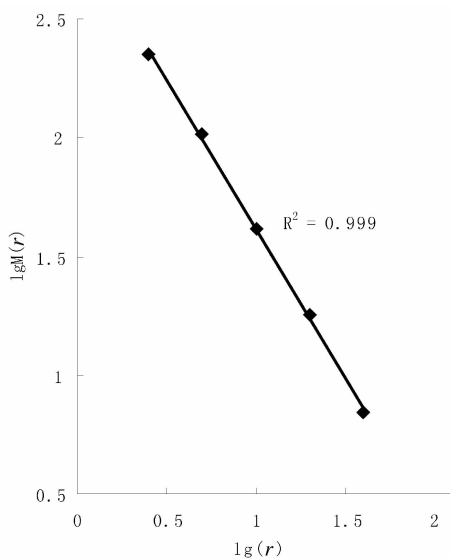


图 6 元宝山子区北西向断裂构造分形分维双对数图
Fig.6 Double logarithm sketch of the N-W trending linear fracture fractal in Yuanbaoshan area

北东向断裂构造分维值(1.412)与整个元宝山地区的断裂构造分维值接近,而明显大于北西向断裂构造的分维值(1.221)。

(3)九万大山区带断裂构造分维值高达 1.730,说明该区构造活动非常强烈,曾经历过强烈的构造

表 3 研究区断裂构造分形分维值统计
Table 3 Fractal dimension values of fractures for the whole area

断裂构造	分维值
九万大山地区断裂构造	1.730
元宝山子区断裂构造	1.419
元宝山子区北东向断裂构造	1.412
元宝山子区北西向断裂构造	1.221

运动,而元宝山子区断裂构造分维值明显小于九万大山地区带。因此,元宝山地区并不能代表九万大山地区带内构造活动最强烈的部位,其在整个研究区范围内应属于构造活动中等强烈区。

(4)从元宝山地区断裂构造分形分维值来看,北东向断裂构造与元宝山地区断裂构造分形分维值接近,大于北西向断裂构造分维值,说明北东向断裂构造为元宝山地区的主导性构造,其强度和复杂性均大于北西向断裂构造。

(5)已有研究表明,剪切断裂典型分维值为 1.1~1.3,而张性断裂典型分维值为 1.5~1.6。因此,九万大山地区带断裂构造属张性,而元宝山子区断裂构造分维值介于 1.2~1.5,表现为张剪性,北西向构造则明显表现为剪性特征。

6 断裂构造分形研究的地质意义

遥感线性构造的分维能够反映地壳深部的构造信息,可以作为深部构造解译的重要参数^[7]。不同构造层断层系的分形维数反映了断裂发育的复杂程度,能够用来定量地表征断裂发育特征^[8]。丁式江^[9]通过对海南岛中西部金矿集中区断裂构造分形研究发现,断裂的分形值较大是形成金矿化的必要条件,但要形成超大型金矿,断裂系统需处于临界分维状态。刘顺生等^[20]通过对水口山矿田断裂构造平面分布特征的分形研究,指出断裂系平面分布的分维值越大,越有利于矿体的形成。韩喜彬等^[21]通过对桂东南地区金银矿带的断裂构造分形研究认为,断裂体系的空间分布有很好的统计自相似性,可以用分形几何的方法和原理来定量研究控矿断裂构造的发育特征和分布规律,进而揭示断裂与金银矿化之间的关系。

已有研究表明,断裂构造分形特性与地质成矿之间的必然联系毋庸置疑,通过对研究区断裂构造的分形研究,揭示出该区的断裂构造具有以下地质

特点及控矿特性:

(1)九万大山地区带断裂构造分形分维值为 1.730,表明该区构造活动强烈,构造运动具有多期多旋回性,为本区地质成矿提供了非常有利的环境及构造条件。总体而言,研究区具有非常好的成矿条件及找矿前景。

(2)通过对元宝山子区断裂构造的分形研究发现,北东向构造为该区的最主要断裂构造(分维值高),表现为规模大、延伸长,属张剪性,在张性和剪性耦合作用的复杂环境下,构造成矿条件非常有利,是该区最主要的成矿构造。因此,在找矿勘探中应重视该类构造的控矿作用。

(3)对于本研究区的不同地带,地质构造活动强度不同,如元宝山子区的构造活动强度明显小于整个九万大山地区带,即元宝山子区在九万大山地区带内构造活动相对薄弱。不同强度的构造活动对成矿的贡献率也不尽相同,成矿预测中应充分体现构造作用权重的改变。

综上所述,北东向构造具有较高的分形分维值,为区内主要的断裂构造类型。这些断裂规模较大,向北延入湘黔境内,在遥感影像上十分醒目,它们控制着丹洲群和震旦系的沉积、火山活动和雪峰期花岗岩的侵入,部分断裂还控制着泥盆系和石炭系的沉积,具有多期次活动的特征,如池洞断裂、四堡断裂、平洞岭断裂、三江—融安断裂等。池洞断裂中—北段东盘上升、西盘下降,南段东盘下降、西盘上升,属正断裂。四堡断裂在通过龙有花岗闪长岩与中泥盆统白云岩地层之间,显示出先张后压扭的特征;在宝坛白石铅锌矿区,断裂通过六庙花岗岩与中泥盆统粉砂质泥岩接触带时,断裂带岩石破碎、硅化强烈,并伴随有铅锌矿化和黄铁矿化。因此,本区成矿作用与构造作用关系密切,断裂分形分维值的高低在一定程度上指示了研究区内的成矿作用强度以及进一步的找矿方向。

7 结论

(1)桂北九万大山地区的遥感解译断裂构造在 2.5~40 km 范围内具有分形特征,在不同的标度下所显示出的分形维数是不同的,反映了断裂构造的不同特征。

(2)断裂构造分形维数能够定量反映不同性质的构造活动强度,指示成矿与控矿构造,研究区北东

向构造分形维数明显高于北西向构造, 北东向构造为区内重要的控矿构造, 诸多已知矿床均受该类构造控制。

(3)通过对不同区块、不同类型的断裂构造分形研究, 在一定程度上指示了研究区内成矿作用的强度, 进一步澄清了找矿方向, 九万大山区内的元宝山地区仍然是今后找矿的重点。

参考文献(References):

- [1] 董连科. 分形理论及其应用 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1991:26-50.
Dong Lianke. Fractal Theory and Application [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 1991:26-50 (in Chinese).
- [2] 张济忠. 分形[M]. 北京:清华大学出版社, 1995:5-10.
Zhang Jizhong. Fractal [M]. Beijing:Tsinghua University Press, 1995:5-10(in Chinese).
- [3] 王东升, 汤鸿霄, 栾兆坤. 分形理论及其研究方法[J]. 环境科学学报, 2001, 21:10-16.
Wang Dongsheng, Tang Hongxiao, Luan Zhaokun. A brief introduction to the fractal theory and methodology[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21:10-16(in Chinese with English abstract).
- [4] 孟宪国. 试论非线性科学在数学地质中的地位和作用 [J]. 地球科学进展, 1993, 8(1):66-71.
Meng Xianguo. A preliminary view on position and action of nonlinear sciences in mathematical geology [J]. Advance in Earth Sciences, 1993, 8(1):66-71(in Chinese with English abstract).
- [5] 孟宪国, 赵鹏大. 地质数据的分形结构[J]. 地球科学, 1991, 16(2): 207-211.
Meng Xianguo, Zhao Pengda. Fractal structure of geological data [J]. Earth Science, 1991, 16 (2):207-211 (in Chinese with English abstract).
- [6] 朱晓华, 闫国年. 地质灾害中的分形研究进展 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(1):11-14.
Zhu Xiaohua, Lv Guonian. Advance of fractal studies in geological hazard [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, 11(1):11-14(in Chinese with English abstract).
- [7] 王祖伟, 周永章, 姚东良, 等. 两广鹿西铜—金山成矿带银金矿床分形性研究[J]. 矿床地质, 1999, 18(2):183-188.
Wang Zuwei, Zhou Yongzhang, Yao Dongliang, et al. Fractal characteristics of silver-gold deposits in the Pangxidong to Jinshan metallogenic belt, south China [J]. Mineral Deposits, 1999, 18(2): 183-188(in Chinese with English abstract).
- [8] 连长云, 苏小四, 朴寿成, 等. 中国大陆深断裂系的分形特征[J]. 世界地质, 1995, 14(3):34-38.
Lian Changyun, Su Xiaosi, Pu Shoucheng, et al. Fractal features of deep fractures in China [J]. World Geology, 1995, 14 (3):34-38(in Chinese).
- [9] 谭凯旋, 郝新才, 戴塔根. 中国断裂构造的分形特征及其大地构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 1998, 22(1):17-20.
Tan Kaixuan, Hao Xincan, Dai Tagen. Fractal features of fractures in China and their implication for geotectonics [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1998, 22(1):17-20(in Chinese with English abstract).
- [10] 谢焱石, 谭凯旋. 断裂构造的分形研究及其地质应用[J]. 地质地球化学, 2002, 30(1):71-77.
Xie Yanshi, Tan Kaixuan. Fractal research on fracture structures and application in geology[J]. Geology-geochemistry, 2002, 30(1): 71-77(in Chinese with English abstract).
- [11] 成秋明. 多维分形理论和地球化学元素分布规律 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25(3):311-318.
Cheng Qiuming. Multifractal theory and geochemical element distribution pattern [J]. Earth Science—Journal of China University of Geoscience, 2000, 25 (3):311-318 (in Chinese with English abstract).
- [12] 申维. 初论分形地质学[J]. 世界地质, 1998, 17(4):75-84.
Shen Wei. A preliminary view on fractal geology [J]. World Geology, 1998, 17(4):75-84(in Chinese with English abstract).
- [13] 隋志龙, 梁金城. 广西恭城——栗木断裂带的分形分析[J]. 广西科学, 2001, 8(2):111-113.
Sui Zhilong, Liang Jincheng. Fractal dimension analysis of Gongcheng-Limu fault zone in Guangxi [J]. Guangxi Sciences, 2001, 8(2):111-113(in Chinese with English abstract).
- [14] 孔凡臣, 丁国瑜. 线性构造分形值的含义[J]. 地震, 1991, 5:33-37.
Kong Fanchen, Ding Guoyu. The implications of the fractal dimension values of lineaments [J]. Earthquake, 1991, 5:33-37(in Chinese with English abstract).
- [15] 张拴宏, 周显强. 断裂系统分形研究新进展[J]. 桂林工学院学报, 2000, 20(1):84-88.
Zhang Shuanhong, Zhou Xianqiang. A review on the fractal of fault systems[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2000, 20 (1):84-88(in Chinese with English abstract).
- [16] 徐志斌. 断裂分形维数与地壳活动性的关系探讨[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(11):54-55.
Xu Zhibin. Study on the relation between fracture fractal dimension and the earth crust activity [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 27 (11):54-55 (in Chinese with English abstract).
- [17] 冯佐海, 梁金城, 李晓峰, 等. 平桂地区遥感线性构造的分形特征及其地质意义[J]. 地球学报, 2002, 23(6):563-566.
Feng Zuohai, Liang Jincheng, Li Xiaofeng, et al. Fractal characteristics of remote sensing lineations in Pinggui area and their geological significance [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23 (6): 563-566(in Chinese with English abstract).
- [18] 朱剑兵, 纪友亮, 李储华. 利用分形维数定量表征断裂发育程度——以红柳地区为例[J]. 石油学报, 2005, 26(5):53-56.
Zhu Jianbin, Ji Youliang, Li Chuhua. Quantitative characterization of development degree of fractures in fault system by fractal dimension:A case of the Hongliu area [J]. Acta Petrolei Sinica,

- 2005, 26(5):53-56(in Chinese with English abstract).
- [19] 丁式江. 海南岛中西部金矿集中区断裂构造的分形研究[J]. 地学前缘, 2004, 11(1):189-194.
- Ding Shijiang. Fractal analysis on fault system in central and western Hainan gold metallogenic province [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1):189-194(in Chinese with English abstract).
- [20] 刘顺生, 谭凯旋. 开放体系成矿动力学——水口山矿田成矿机理探讨[M]. 北京:地震出版社, 1996:67-80.
- Liu Shunsheng, Tan Kaixuan. Dynamics of Ore-Forming in Open Systems——The Mechanism of Ore-Forming of the Shuikoushan Ore Field [M]. Beijing:Seismological Press, 1996:67-80 (in Chinese).
- [21] 韩喜彬, 梁金城, 冯佐海, 等. 桂东南地区断裂构造分形特征与金银成矿关系研究[J]. 广西科学, 2003, 10(2):117-121.
- Han Xibin, Liang Jincheng, Feng Zuohai, et al. Fractal features of fractures and their relation to silver-gold mineralization in southeast Guangxi [J]. *Guangxi Sciences*, 2003, 10(2):117-121 (in Chinese with English abstract).

Fractal characteristics of fractures in Jiuwandashan area and their geological significance

CHENG Yong-sheng

(1. School of Info-physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;

2. Guangxi Huaxi Co. Ltd., Liuzhou 545006, Guangxi, China; 3. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: The fractal structure of the fracture makes it possible to give a quantitative description. The fractal dimension value of the fracture can indicate the deposit location and the migration of ore-forming fluids. The high fractal dimension value can suggest the intense tectonic movement favorable for the activation of elements, the migration and concentration of ore-forming fluids, and the formation of large and super-large ore deposits. By means of multi-band remote sensing images in combination with the regional geological background, the author interpreted the fractures and made a quantitative investigation based on the theory of fractal geometry. The results show that there exists a high fractal dimension value of fracture in Jiuwandashan area, which shows the complicated fracture belt and the intense tectonic movement. Nevertheless, the fractal dimension value of fracture is relatively low in Yuanbaoshan area. In addition, the fractal dimension value of the northeast fracture is higher than that of the northwest fracture, suggesting the dominating property of the northeast fracture in this area, which is consistent with the regional tectonic characteristics.

Key words: fractal; fracture; geological interpretation; remote sensing; Jiuwandashan

About the author: CHENG Yong-sheng, male, born in 1979, doctor and lecturer, mainly engages in the teaching and research of mineral deposits, mineral exploration and metallogenic prognosis; E-mail: cys968@163.com.