

云南个旧期北山七段玄武岩中 磁黄铁矿结构变化分形特征

李增华^{1,2}, 成秋明^{2,3}, 谢淑云^{2,3,4}, 徐德义^{2,3,5}, 夏庆霖², 张生元⁶

1. 天津华北地质勘查局, 天津 300181

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 加拿大约克大学地球空间科学与工程系, 加拿大多伦多 M3J1P3

4. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

5. 中国地质大学经济管理学院, 湖北武汉 430074

6. 石家庄经济学院资源与环境工程研究所, 河北石家庄 050031

摘要: 微观尺度上土壤孔隙、岩石孔洞缝、矿物组构的分形与多重分形研究受到广泛关注, 典型的 $P-A$ (周长—面积) 分形模型、盒子维数等也广泛应用于其中。云南个旧锡多金属矿床老厂期北山垂向上七段玄武岩发育完整, 但对其形成机理及对成矿的贡献有较多的争议。这七层玄武岩中磁黄铁矿广泛发育。基于 GIS 的 $P-A$ 分形模型研究磁黄铁矿颗粒的大小、颗粒的不规则性及空间分布特征, 探讨磁黄铁矿这一标志性矿物在不同层段玄武岩中的变化情况, 并为玄武岩的成因给出新的解释。结合盒子维数, 分形分析结果显示, 从第一段玄武岩到第七段玄武岩磁黄铁矿的面积分维 D_A 和周长分维 D_P 总体保持不变的态势; 而周长—面积分维 D_{PA} 却有逐渐增大的趋势。 D_{PA} 增大表明随着深度的增加, 磁黄铁矿颗粒不规则性增强。

关键词: 分形模型; 微构造; 玄武岩。

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2009)02-0275-06

收稿日期: 2008-12-15

Application of $P-A$ Fractal Model for Characterizing Distributions of Pyrrhotites in Seven Layers of Basalts in Gejiu District, Yunnan, China

LI Zeng-hua¹, CHENG Qiu-ming^{2,3}, XIE Shu-yun^{2,3,4}, XU De-yi^{2,3,5}, XIA Qing-lin², ZHANG Sheng-yuan⁶

1. North China Geological Exploration Bureau, Tianjin 300181, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Department of Earth and Space Science and Engineering, York University, Toronto M3J1P3, Canada

4. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

5. Faculty of Economics and Management, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

6. Institute of Natural Resources and Environment Engineering, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China

Abstract: The study on micro-pores of soils, pore-fracture-holes of sedimentary rocks and microstructures of minerals at different scales has attracted more and more attention. Typical fractal models, including $P-A$ and box-counting methods, have also been used for such kind of studies. Basalts from seven sections in Laochang deposit, Yunnan Province, are well developed, but their forming processes and their contributions to deposits of Sn and other metals are still in issue. Based on the GIS-based $P-A$ and box-counting fractal models, this paper focuses on the size distribution and irregularity analysis of pyrrhotites of the basalts. Three parameters D_A (fractal dimension of area), D_{PA} (fractal dimension of area and perimeter) and D_P (fractal dimension of perimeter) of pyrrhotite are calculated. The results show that, from the first-section basalt to the seventh-section basalt, with the depth of rock body increasing, the values of D_A and D_P change a little, but the value of D_{PA} shows an increasing trend. This indicates that the shapes of pyrrhotites become more and more irregular as the depth increases, probably due to the increase of temperature and pressure.

Key words: fractal model; micro-texture; basalt.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 40502029, 40523009, 40638641, 40872193); 地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费资助。
作者简介: 李增华 (1983—), 硕士, 从事矿产勘查与数学地质学的研究。E-mail: lizenghua@gmail.com

自从分形概念提出以来,已有多种分形模型被提出.分形与多重分形在矿床时空结构的研究中取得了重要的成果,从宏观尺度(km)到微观尺度(μm)等多方面均有涉及.矿物微观组构和元素含量在小尺度及微观区域上的分形与多重分形研究是目前国内外的一大热点.其中 $P-A$ (周长-面积)模型用以刻画具自相似性物体的不规则几何特征. Mandelbrot (1982, 1983) 提出了 $P-A$ 模型(周长-面积模型),将具自相似性的不规则变形几何体的周长与面积联系起来. $P-A$ 模型就是所谓的“岛弧模型”,用以定量度量不规则的复杂断面,包括计算表面的分形维数. Lovejoy (1982) 用 $P-A$ 模型量化了雨和云形状的几何复杂度. Mandelbrot *et al.* (1984) 用此模型研究了金属表面的裂隙. Goodchild (1988) 发现该模型有一定的局限性,因为应用该模型计算的结果与模拟的结果常常不一致. Cheng *et al.* (1994)、Cheng (1995) 提出了 $P-A$ 模型新的通用表达式,新的 $P-A$ 模型不仅适用于规则的断面集合体,也适用于分形集合体.新的 $P-A$ 模型回答了“ $P-A$ 模型计算的结果与模拟的结果常常不一致”的问

题,已应用于分离地球化学异常,度量矿物表面微量元素分布(Zhang *et al.*, 2001),描述地表河流的分布模式(Cheng, 2001). Gulbin and Evangulova (2003) 运用分维定量地刻画了不同花岗岩中石英颗粒形貌特征,并通过计算机模拟了结晶和变质重结晶过程花岗岩结构的变异性,由此提取微观信息用于成矿规律等研究; Wang *et al.* (2005, 2008) 研究了方铅矿、闪锌矿等矿物颗粒的几何形态分布特征; Wang *et al.* (2005, 2007)、王志敬和成秋明 (2006) 基于 ArcGIS 系统运用 $P-A$ 分形方法通过分形维数定量刻画了不同阶段糜棱岩演化过程中石英颗粒的外部形态及其大小变化的情况,加入分形维数这一新的参数配合长短轴比率定量刻画晶体生长; Zuo *et al.* (2008) 研究了个旧锡矿两种锡矿石分类,指出不同类的锡石其分形维数明显不同.

本研究基于 GIS 的 $P-A$ (周长-面积)分形模型,研究磁黄铁矿颗粒的大小、不规则性及空间分布特征,探讨磁黄铁矿这一标志性矿物在云南个旧锡多金属矿床不同层段玄武岩中的变化情况,并为玄武岩的成因给出新的解释.

表 1 云南个旧期北山七段玄武岩特征

Table 1 Properties of seven layers of basalts in Qibeishan of Gejiu district, Yunnan Province

编号	岩体深度(m)	岩性	显微镜下观察	磁黄铁矿颗粒特征
第 1 段玄武岩	432.77~446.89	透闪石黑云母化玄武岩	黑云母多于透闪石.其结构为变余斑状结构,斑晶主要是斜长石和辉石,基质中见长柱状的透闪石以及夹于其中的磷片状的黑云母和绢云母,构成了变余间片结构.矿石矿物主要是磁黄铁矿,其次是黄铜矿	半自形-他形粒状结构、压碎状结构,含量 10%~20%,粒度 0.005~0.2 mm
第 2 段玄武岩	448.89~466.82	黑云母透闪石化玄武岩	透闪石多于黑云母.其结构为长柱状的透闪石以及夹于其中的磷片状的黑云母和绢云母构成的变余间片结构.矿石矿物主要是磁黄铁矿,其次是黄铜矿,零星分布少量黄铁矿	半自形-他形粒状结构、压碎状结构,含量 10%~20%,粒度 0.005~0.3 mm
第 3 段玄武岩	467.82~473.97	黑云母透闪石化玄武岩	其结构为变余斑状结构,斑晶主要是斜长石和辉石.矿石矿物主要是磁黄铁矿,其次是黄铜矿	他形粒状结构、压碎状结构,含量 40%左右,粒度 0.005~0.3 mm
第 4 段玄武岩	489.45~491.70	黑云母透闪石化玄武岩	其结构为变余斑状结构,矿石矿物主要是磁黄铁矿,其次是黄铜矿,零星分布少量黄铁矿	半自形-他形粒状结构、压碎状结构,含量 10%~20%,粒度 0.005~0.3 mm
第 5 段玄武岩	493.17~496.67	黑云母透闪石化玄武岩	其结构为变余斑状结构,矿石矿物主要是磁黄铁矿,其次是黄铜矿,零星分布少量黄铁矿	半自形-他形粒状结构、压碎状结构,含量 10%~20%,粒度 0.005~0.3 mm
第 6 段玄武岩	498.42~500.67	黑云母透闪石化玄武岩	其结构为变余斑状结构,矿石矿物主要是磁黄铁矿,其次是黄铜矿	半自形-他形粒状结构、压碎状结构,含量 10%~20%,粒度 0.05~0.3 mm
第 7 段玄武岩	503.74~512.19	黑云母透闪石化玄武岩	其结构为变余斑状结构,矿石矿物主要是磁黄铁矿,其次是黄铜矿,零星分布少量黄铁矿	半自形-他形粒状结构、压碎状结构,含量 10%~20%,粒度 0.005~0.3 mm

注:资料据云溪公司,标本取样于老厂期北山 1 700 m 中段 D21 勘探线 CK04-2101 钻孔.

1 地质背景

个旧锡矿以开采历史悠久的超大型锡多金属矿床而闻名中外.但近年来,矿产资源发生危机,亟需加强找矿研究.个旧地区的印支期玄武岩可以分为三期,其中第一期安尼锡克期的火山岩分布在个旧东区,主要产出于个旧组下段(T_2g^1)的碳酸岩层中,呈北东向出露或隐伏于松树脚矿田的麒麟山—老厂—卡房—田心坝子一带.个旧锡多金属成矿可能与该期基性火山岩有一定关系(黎应书等, 2006, 2007).

本文研究的玄武岩取样于老厂期北山 1 700 m 中段 D21 勘探线 CK02101 钻孔(据云南云锡公司),从地表到深部总共发育有七段玄武岩,此钻孔终孔于 517.44 m,未见玄武岩底.

岩石类型为变质玄武岩,与碳酸盐岩呈整合接触关系,只能见到部分斜长石,蚀变矿物主要为黑云母、透闪石、绿帘石、金云母、绿泥石和绢云母等,其中黑云母化和透闪石化是最常见的蚀变现象.其结构为变余斑状结构,斑晶主要是斜长石和辉石,基质中见长柱状的透闪石以及夹于其中的磷片状黑云母和绢云母,为变余间片结构,块状构造.玄武岩均有

微弱矿化,主要是磁黄铁矿,含量为 10%~20%;其次为黄铜矿和黄铁矿,含量 1%~5%.磁黄铁矿、黄铜矿及部分浸染状黄铁矿多呈半自形—他形粒状结构、压碎状结构,粒度一般 0.05~0.3 mm.根据野外和镜下观察,各段玄武岩基本特征及磁黄铁矿颗粒特征如表 1 所示.

2 数据前处理

磁黄铁矿的显微镜镜下照片可以数字化成具有 256 个灰度值的黑白图像,然后根据灰度值转换成等高线图.通过 GIS 技术,研究对象磁黄铁矿可以从图像中提取出来,转换成矢量数据,并计算出每颗磁黄铁矿颗粒的周长和面积.下面以第 1 段玄武岩为例,来说明图像处理的全过程(图 1).

图 1a 是显微镜下第 1 段的原始图片.在 Arc-View 环境下,该图像可被转换成栅格图像,并根据灰度值转换成等值线图.等值线图中,灰度为 160 (图 1b)的等值线能很好地圈定磁黄铁矿颗粒,进而从图像中提取磁黄铁矿颗粒,形成一幅代表磁黄铁矿颗粒的等值线图.通过编辑,可删除矢量图像不必要的数

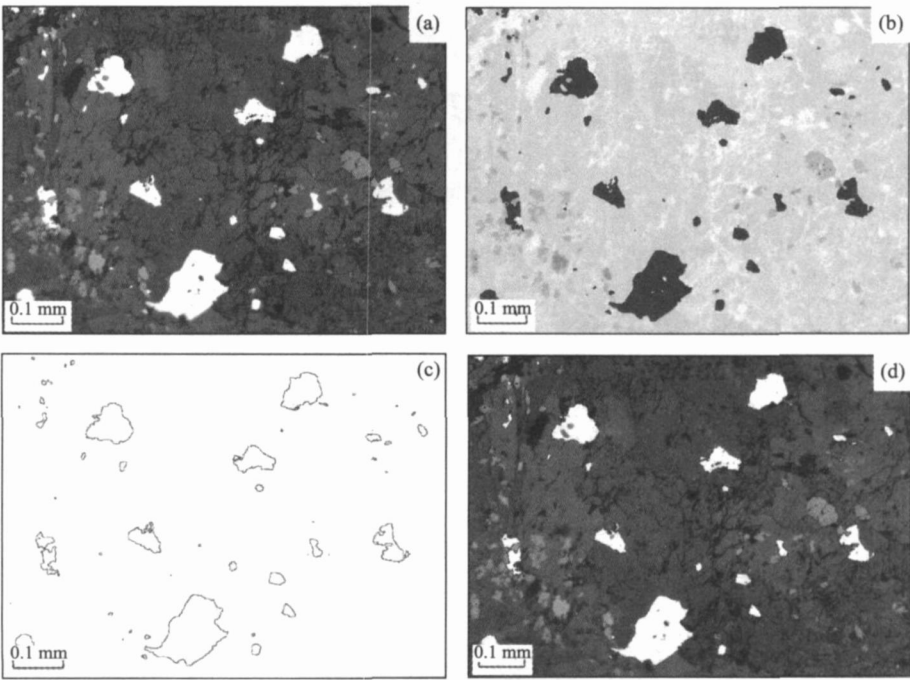


图 1 GIS 技术处理磁黄铁矿的显微图像过程

Fig. 1 GIS-based technique for processing micrographs of pyrrhotite grains

a. 玄武岩第 1 段的原始图片;b. 等高线图中灰度值为 160 时圈定的磁黄铁矿颗粒;c. 用 GIS 技术从图 a 中提取磁黄铁矿颗粒的矢量图;d. 图 c 叠加在图 a 上的结果,可看出两者的差别

果显示如图 1c 所示图像. 将图 1c 叠加在图像图 1a 上, 以显示与原图的差异. 该工作过程可以循环进行, 直至二幅图像之间的差异可以忽略不计. 将该等值线图转换成一幅代表磁黄铁矿颗粒的矢量图, 从而精确计算出每颗磁黄铁矿的周长和面积. 用同样的方法, 可以处理其他岩石的图像, 作出相应的磁黄铁矿颗粒矢量图, 并计算出其中每颗磁黄铁矿的周长和面积.

3 计盒维数

首先, 将磁黄铁矿从图像中提取出来, 对图像进行灰度调整、特征检测、边界识别等处理, 然后进行二值化, 转化为黑白位图.

根据图像计盒维数的计算过程(丁保华等, 1999), 编写 MATLAB 程序对二值图进行网格划分与统计, 可以得到一系列“网格大小”与相应“覆盖网格数”的数据对, 即子矩阵阶数与包含图像点(像素点为 0) 的子矩阵个数的数据对; 然后在双对数坐标系下绘出数据点, 进行线性回归分析, 如能得到一条线性相关的直线, 直线斜率的负值即为图像的计盒维数. 图 2 为第一段玄武岩中某一视域下磁黄铁矿

(图 1a)的盒子维数分析结果, 从中可以看出, 磁黄铁矿在不同微观尺度上具有分形分布特征. 经过多个视域的观察和统计, 计算出第一段玄武岩中磁黄铁矿颗粒的盒子维数平均值约 1.526(表 2), 其他六层玄武岩中磁黄铁矿颗粒的统计结果亦列于表 2 中.

4 P-A 模型

P-A 一般模型(Cheng, 1995)表达式如下:
$$P \propto A^{\frac{1}{2} D_{PA}},$$

其中, P 是矿物颗粒的周长, A 是面积, $\propto$ 代表“成比例”, D_{PA} 为幂函数的幂指数. 要确定针对 P - A 分形维数 D_{PA} , 可用线性回归分析确定对数 P 与对数 A 的斜率, 斜率的 2 倍即是分形维数 D_{PA} , 其表达式为:

$$\log P = C + \frac{1}{2} D_{PA} \log A,$$

其中, C 是常数. D_{PA} 可进一步表示为 $D_{PA} = 2D_P/D_A$, 其中 D_P 与 D_A 分别是周长 P 和面积 A 的分形维数. 如果处理断面为规则($D_A=2$)的几何体, 那么 $D_{PA} = D_P$, 这时 Cheng(1995)就变为 Mandelbrot(1982)提出的 P - A 模型, 后者为前者的特例. 如果由于某些条件如蚀变等使矿物颗粒的形态变得不规则, 其 $D_A < 2$. 这种情况下, $D_{PA} > D_P$. 因此不能简单地采用 D_{PA} 来代表 D_P . 这就是 Mandelbrot(1982)提出的 P - A 模型的问题所在(Cheng, 1995). 通常情况下, $1 \leq D_{PA} \leq 2$. 如果 $D_{PA} = 1$, 那么 $P \propto A^{0.5}$, 它表示有规则的断面集合体, 如正方形或圆周. D_{PA} 愈大, 断面也愈不规则. 如果 $D_{PA} = 2$, 那么 $P \propto A$, 它表示极端不规则的断面, 周长以同样的速度随面积而变化, 换句话说, 周长变化尺度与面积相同. 因此, 可以用分形维数 D_{PA} 趋近 2 的程度度量矿物颗粒的不规则性, 即 D_{PA} 愈趋近 2, 颗粒愈不规则.

应用 P - A 模型, 将计算出的磁黄铁矿颗粒周长和面积数据投影在 $\log$ - $\log$ 图上, 图 3 为图 1a 的 P - A 分析结果. 通过最小二乘法, 可计算磁黄铁矿颗粒的 P - A (周长-面积)的斜率, 进而计算出 P - A 分形维数. 从图 3 可以看出, 面积的对数值和周长的对数值之间存在明显的线性关系, 或者说面积和周长之间存在明显的幂律关系, 相关系数 R^2 大于 0.95, 表明线性相关性很好. 通过对七段玄武岩中磁黄铁矿颗粒的分析, 发现 P - A 拟合直线的斜率在 0.6 左

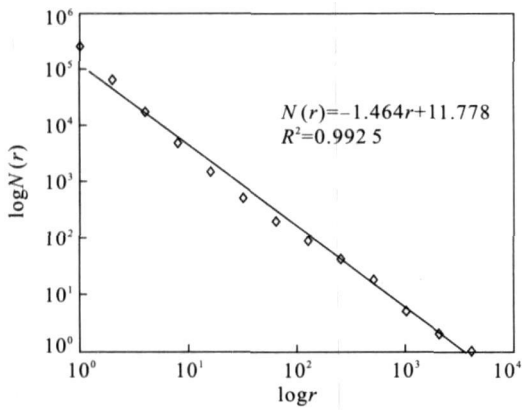


图 2 图 1a 中磁黄铁矿颗粒分布的 $\log N(r)$ - $\log r$ 关系
Fig. 2 $\log N(r)$ - $\log r$ plot for pyrrhotite grains in Fig. 1a

表 2 各段玄武岩中磁黄铁矿颗粒的计盒维数
Table 2 Box-counting dimension of pyrrhotite grains in different basalts

D_A	第一段	第二段	第三段	第四段	第五段	第六段	第七段
位置 1	1.464	1.473	1.457	1.334	1.670	1.638	1.550
位置 2	1.555	1.497	1.459	1.370	1.556	1.518	1.456
位置 3	1.475	1.492	1.413	1.330	1.556	1.439	1.459
位置 4	1.609	1.412	1.161	1.393	1.561	1.523	1.526
平均值	1.526	1.469	1.485	1.357	1.586	1.530	1.497

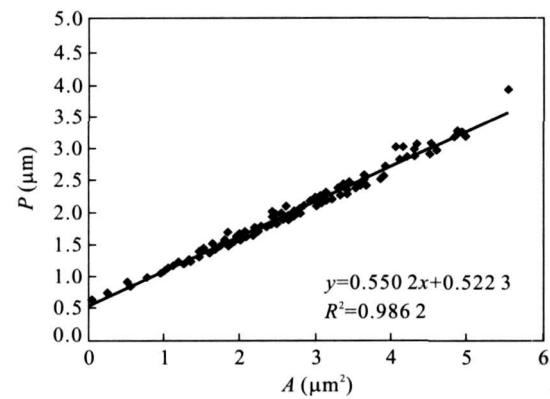


图 3 图 1a 玄武岩中磁黄铁矿颗粒的周长—面积投影
Fig.3 log-log plot of P - A of pyrrhotite grains in Fig. 1a

表 3 七段玄武岩中磁黄铁矿对应的平均分维值

Table 3 Different fractal dimensions of pyrrhotite in seven basalts

参数	第一段	第二段	第三段	第四段	第五段	第六段	第七段
D_{PA}	1.101	1.126	1.184	1.140	1.209	1.247	1.186
D_A	1.526	1.469	1.485	1.357	1.586	1.530	1.497
D_P	0.840	0.827	0.879	0.773	0.959	0.954	0.888

右,变化范围在 0.545~0.624 之间;对应的 D_{PA} 值为 1.2 左右,变化范围在 1.090~1.248 之间.其平均值为 1.161,标准差为 0.055 2.总的来说,该七段玄武岩中的磁黄铁矿之间 D_{PA} 差别不大.

根据 $D_P=0.5 D_{PA} \times D_A$ 可以计算出每段玄武岩中磁黄铁矿颗粒的周长分形维数 D_P (表 3). D_P 可以反映磁黄铁矿颗粒的不规则性.从表 3 可以得到, D_P 分布在 0.8 左右,平均值为 0.868,标准差为 0.071.

得到反映颗粒变化的参数面积分维 D_A 、周长—面积分维 D_{PA} 和周长分维 D_P 后,拟合不同分维值随对应玄武岩段的变化曲线(图 4),并求得了秩相关系数(分维数与岩层秩序之间的相关系数).查表求得在显著水平 0.05 和自由度 $7-2=5$ 的相关系数临界值 $R_{0.05}=0.754 5$,因为 D_A 和 D_P 的 R 值分

别为 0.148 和 0.545,均小于 $R_{0.05}$,这说明 D_A 和 D_P 虽然随不同段的玄武岩略有增加但不具有统计显著性,而 D_{PA} 的 $R=0.792>R_{0.05}$,说明 D_{PA} 和不同段的玄武岩之间存在线性相关关系.

5 结果与讨论

本文通过 GIS 手段和数学工具 MATLAB 的使用,用 P - A 、计盒维数这两种不同的分形模型分别研究了老厂期北山七段玄武岩中磁黄铁矿颗粒的分布特征,得到了反映颗粒变化的参数面积分维 D_A 、周长—面积分维 D_{PA} 和周长分维 D_P ,拟合了不同分维值随岩层的变化曲线,并求得了秩相关系数(分维数与岩层秩序之间的相关系数),结果说明 D_A 和 D_P 虽然随不同段的玄武岩略有增加但不具有统计显著性,而 D_{PA} 和不同段的玄武岩之间存在线性相关关系.

从图 4 中可以看出,随着岩体深度的增加,从第一段到第七段,磁黄铁矿的面积分维 D_A 和周长分维 D_P 略有增加,总体变化不大;而周长—面积分维 D_{PA} 却有逐渐增大的趋势, D_{PA} 从 1.100 5 增加到 1.247.

随着深度的变大, D_{PA} 的值有变大的趋势,说明磁黄铁矿颗粒逐渐变得不规则起来.这种现象可能是由于随着深度的增加温度升高、压力变大引起的.更详细的原因还需做更进一步的工作.本次研究结果显示,玄武岩中磁黄铁矿的分布随着深度的变化在频率上、边界形态上并无显著变化,但矿物形态变得更加不规则,这一发现对于进一步研究玄武岩中磁黄铁矿的形成条件和对成矿的指示作用是有益的.特别是 P - A 分形模型为研究矿物形态特征提供了有效的度量方法.

致谢:本文相关工作受国家自然科学基金联合资助 (Nos. 40502029, 40525009, 40638041, 40872195).在样品的制备与薄片观察阶段,得到了

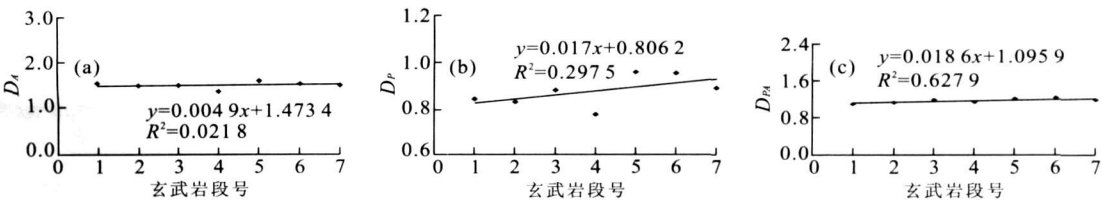


图 4 七段玄武岩 D_A 、 D_P 、 D_{PA} 投影图

Fig.4 Regression fits of D_A , D_P , D_{PA}

中国地质大学(武汉)资源学院薄片观察室陆健培老师的指导,云南省云溪公司对整个野外工作给予了大力帮助,在此一并表示感谢。

References

- Cheng, Q. M., 1995. The perimeter-area fractal model and its application to geology. *Math. Geol.*, 27(1): 69–82.
- Cheng, Q. M., 2001. GIS-based statistical and fractal/multi-fractal analysis of surface stream patterns in the Oak Ridges—Moraine. *Computers & Geosciences*, 27(5): 513–526.
- Cheng, Q. M., Agterberg, F. P., Ballantyne, S. B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 51(2): 109–130.
- Ding, B. H., Li, W. C., Wang, F. M., 1999. Analysis of fractal image and design of fractal dimension calculation program. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 21(3): 304–307 (in Chinese with English abstract).
- Goodchild, M. F., 1988. Lakes on fractal surfaces: A null hypothesis for lake-rich landscapes. *Math. Geol.*, 20(6): 615–630.
- Gulbin, Y. L., Evangulova, E. B., 2003. Morphometry of quartz aggregates in granites: Fractal images referring to nucleation and growth processes. *Math. Geol.*, 35(7): 819–833.
- Li, Y. S., Qin, D. X., Dang, Y. T., 2006. Lithological features of basalt in Gejiu eastern area, Yunnan Province. *Science & Technology Review*, 24(02): 70–72 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. S., Qin, D. X., Hong, T., et al., 2007. The ore-controlling of basalt of the Indo-Chinese epoch in eastern Gejiu, Yunnan Province. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 59(1): 26–29 (in Chinese with English abstract).
- Lovejoy, S., 1982. Area-perimeter relation for rain and cloud areas. *Science*, 216(4542): 185–187.
- Mandelbrot, B. B., 1982. *The fractal geometry of nature*. W. H. Freeman, New York, 468.
- Mandelbrot, B. B., 1983. *The fractal geometry of nature* (updated and augmented edition). W. H. Freeman, New York, 468.
- Mandelbrot, B. B., Passoja, D. E., Paullay, A. J., 1984. Fractal character of fracture surfaces of metals. *Nature*, 308(5961): 721–722.
- Wang, Z. J., Cheng, Q. M., Xia, Q. L., 2005. The $P-A$ fractal model characterizing microstructure of minerals. In: Cheng, Q. M., et al., eds., *Proceedings of IAMG'05: GIS and spatial analysis*. China University of Geosciences Press, Wuhan, 317–322.
- Wang, Z. J., Cheng, Q. M., 2006. Characterization of micro-texture of quartz mylonite deformation process using fractal $P-A$ model. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(3): 361–365 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. J., Cheng, Q. M., Li, C., et al., 2007. Fractal modelling of the microstructure property of quartz mylonite during deformation process. *Math. Geol.*, 39(1): 53–68.
- Wang, Z. J., Cheng, Q. M., Xu, D. Y., et al., 2008. Fractal modeling of sphalerite banding in Jinding Pb-Zn deposit, Yunnan, southwestern China. *Journal of China University of Geosciences*, 19(1): 77–84.
- Zhang, Z., Mao, H., Cheng, Q. M., 2001. Fractal geometry of element distribution on mineral surfaces. *Math. Geol.*, 33(2): 217–228.
- Zuo, R., Cheng, Q. M., Xia, Q. L., et al., 2008. Application of fractal models to distinguish between different mineral phases. *Mathematical Geosciences*, DOI: 10. 1007/s11004-008-9191-3.

附中文参考文献

- 丁保华, 李文超, 王福明, 1999. 分形图像分析与分形维数计算程序的设计. 北京科技大学学报, 21(3): 304–307.
- 黎应书, 秦德先, 党玉涛, 2006. 云南个旧东区玄武岩岩石学特征. 科技导报, 24(02): 70–72.
- 黎应书, 秦德先, 洪托, 等, 2007. 个旧东区印支期玄武岩的控矿作用. 有色金属(矿山部分), 59(1): 26–29.
- 王志敬, 成秋明, 2006. $P-A$ 分形模型定量度量糜棱岩变形过程中石英微结构的变化. 地球科学——中国地质大学学报, 31(3): 361–365.