

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

王志敬^{1,2}, 成秋明^{1,2}

1. 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

2. 加拿大约克大学地球与空间科学工程系, 多伦多 M3J1P3

摘要: 定量度量动力变质作用下组成糜棱岩矿物颗粒的不规则变化是一项挑战性的研究. 以基于 GIS 的 P-A (周长—面积) 模型定量地描述糜棱岩中具自相似性石英形态的不规则变化. 研究实例是苏格兰西北地区 Moine 逆冲断裂带前缘变质程度不同的 5 种类型的糜棱岩. 石英是糜棱岩的主要矿物成分, 其镜下的显微图片经扫描转换成数字图像, 再通过 GIS 技术转换成矢量图, 并计算出每颗石英的周长和面积. 研究表明, 随变质程度的增加, 其 P-A 分形维数分别从 1.20、1.28、1.38、1.46, 逐步增加到 1.60. 这表明, 随变质程度的增加, 变形程度与动态重结晶作用加强, 石英颗粒从规则到不规则.

关键词: 分形模型; 微构造; 石英; 糜棱岩; 动力变质.

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2006)03-0361-05

收稿日期: 2005-11-25

Characterization of Micro-Texture of Quartz Mylonite Deformation Process Using Fractal P-A Model

WANG Zhi-jing^{1,2}, CHENG Qiu-ming^{1,2}

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

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

Abstract: Quantifying the degree of quartz mylonite deformation, including the irregularities of the frequency distribution of the minerals involved, is one of the most challenging areas in mylonite analysis. Fractal modelling is here demonstrated to be an effective means to achieve this goal. The P-A (perimeter-area) model is used to quantify the irregularities of quartz, the main mineral component of mylonite, in the geometries. Five types of mylonites with different degrees of deformation within the foreland of the Moine thrust zone in NW Scotland were selected. The quartz was extracted from digital photomicrographs of multiscale-grey image grid data, and converted into vector data. The areas and perimeters of these quartz grains were calculated by GIS-based technologies. There is an increase in the degree of deformation of mylonite from type 1 to type 5, a D_{AP} (the perimeter-area fractal dimension) increase from 1.20, 1.28, 1.38, 1.46 to 1.60, respectively. The results indicate quantitatively that quartz grains change from a regular to an irregular shape.

Key words: fractal model; micro-texture; quartz; mylonite; deformation.

0 引言

自从 Mandelbrot 在 1977 年提出分形概念以来, 已有多种分形模型被提出, 以定量描述几何物体和模式形态的不规则性. 其中, P-A (周长—面积) 模

型 (Mandelbrot, 1982; Cheng, 1995) 用以描述具相似性物体的不规则几何特征. P-A 模型最早是 Mandelbrot (1982) 提出, 也就是所谓的“岛湖模型”, 把具自相似性的不规则变形几何体的周长与面积联系起来, 用以度量不规则的复杂断面, 包括计算断面

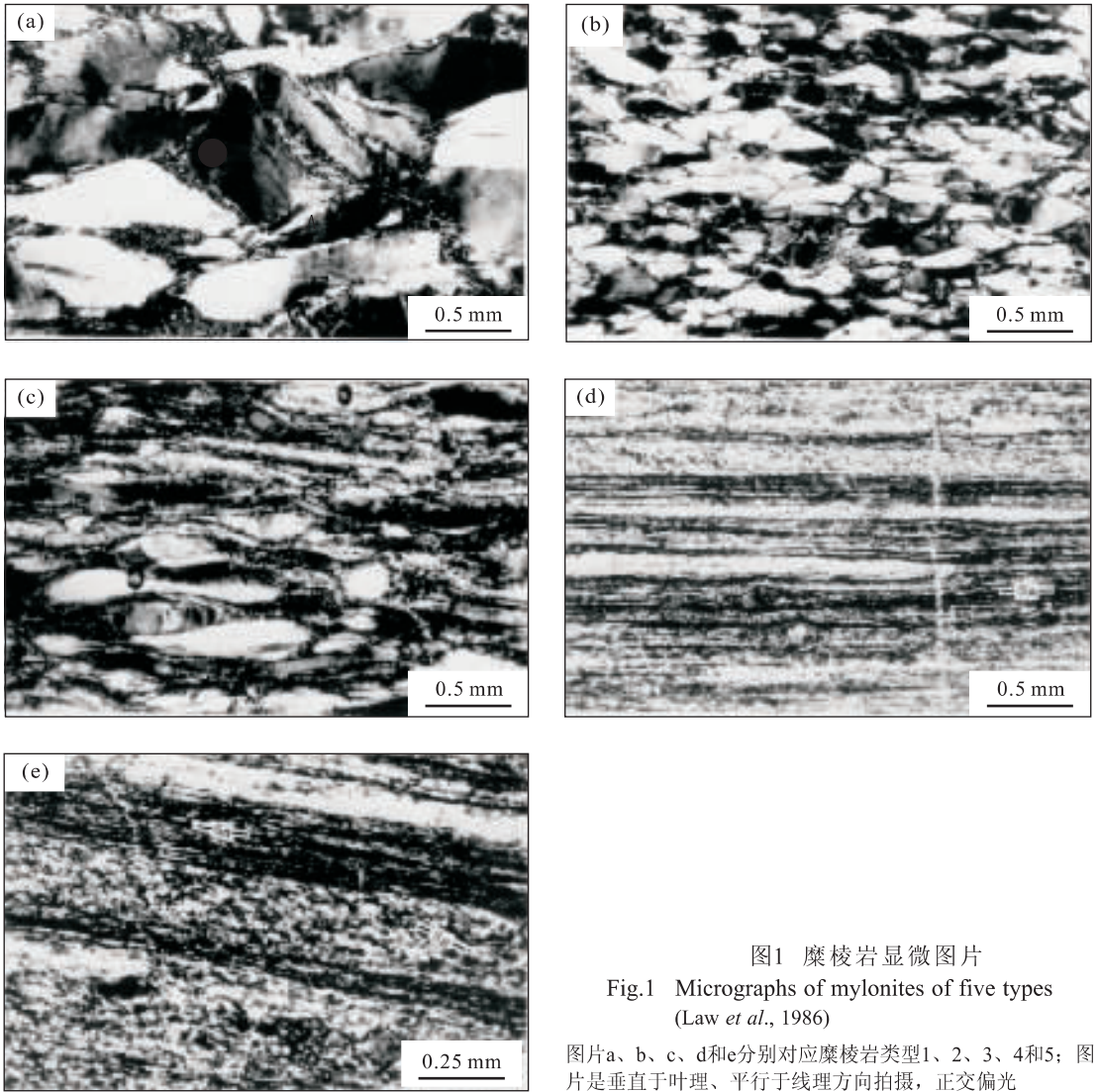


图1 糜棱岩显微图片

Fig.1 Micrographs of mylonites of five types (Law *et al.*, 1986)

图片a、b、c、d和e分别对应糜棱岩类型1、2、3、4和5；图片是垂直于叶理、平行于线理方向拍摄，正交偏光

的分形维数. Cheng(1995)提出了 $P-A$ 模型新的一般表达式, 新的 $P-A$ 模型不仅实用于规则的断面集合体, 也适用于分形集合体, 并成功地应用于地球化学异常分离和矿产资源评价(成秋明, 2003, 2004)、矿物表面微量元素的分布与成矿的温度与压力关系(Zhang *et al.*, 2001)以及花岗岩中石英集合体的形貌特征(Gulbin and Evangulova, 2003). 本文用基于GIS的 $P-A$ 一般模型(Cheng, 1995)定量描述糜棱岩变形过程中矿物成分石英颗粒形态的不规则性.

1 地质背景

糜棱岩是动力变质作用的结果. 在形成过程中, 其组成矿物将会经历形态、大小和数量等方面的变化. 在封闭有限的空间里, 呈固态的粒状石英颗粒被

挤压成扁平状、条带状, 并伴有石英动态重结晶. 分形 $P-A$ 模型能定量地描述变质程度不同的糜棱岩中石英颗粒的几何特征, 这是岩石学家和构造学家们感兴趣的. 苏格兰西北部的 Moine 断裂带是最早的逆冲断裂带, 由一系列次一级的逆冲断裂组成. 在 Moine 断裂带的下面糜棱岩非常发育, 并有很好的露头. 概括 Law *et al.* (1986) 的研究成果, 可依据糜棱岩的变质程度、矿物颗粒定向拉长排列及石英颗粒动态重结晶程度, 将 Moine 断裂带前缘 Assynt 北部 Glebcoul 地区前寒武纪糜棱岩分为 5 种类型(图 1a—e). 从类型 1 到类型 5, 自下向上靠近 Moine 逆冲断裂面, 组成糜棱岩的石英矿物具以下特点: (1) 石英变形程度逐渐增加, 石英形态由球状、轻微压扁状、压扁状到变形条带状, 愈来愈不规则; (2) 残留石英颗粒长短轴比率增加, 由 2 : 1 到 80 : 1;

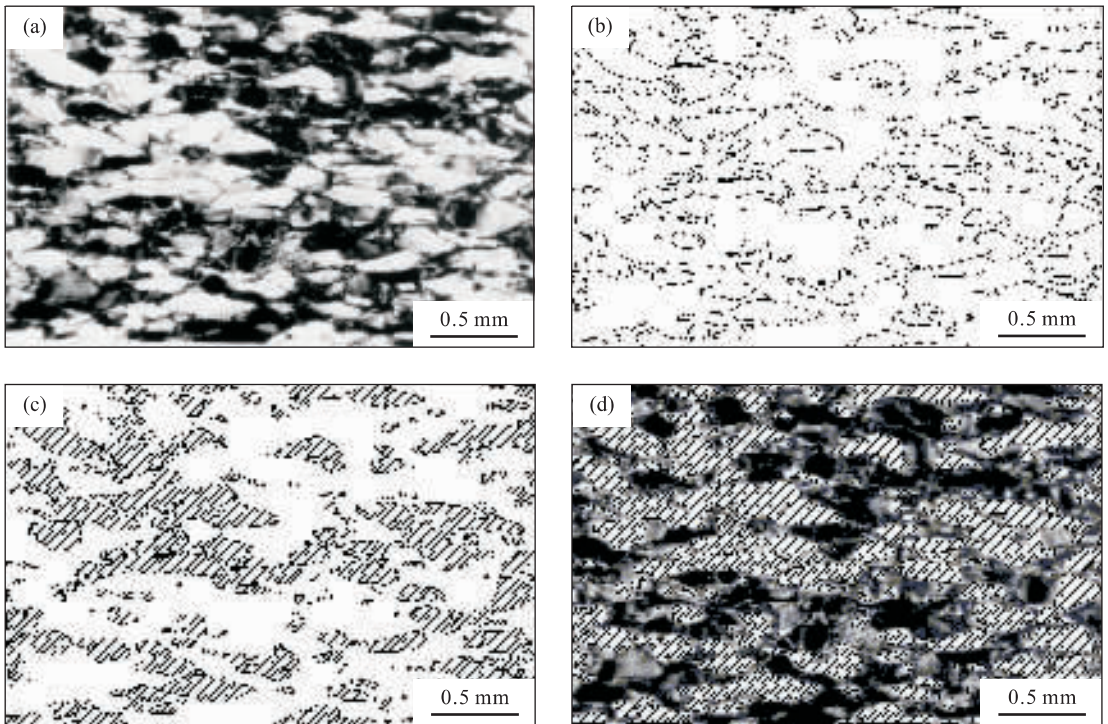


图 2 GIS 技术处理石英的显微图像过程

Fig. 2 GIS-based technique for processing micrographs of quartz grains

a. 糜棱岩类型 2 的原始图片; b. 等高线图中灰度值为 180 时圈定的石英颗粒; c. 用 GIS 技术从 a 中提取石英颗粒的矢量图; d. c 叠加在 a 上, 以显示二者的差别

(3) 残余石英含量减少, 重结晶石英含量增加, 达 60%~100%; (4) 残余石英与重结晶石英定向排列, 优先排列方向 SB 与叶理方向 SA 夹角增加; (5) 整个糜棱岩石英粒度逐渐变小, 但数量大大增加。

2 数据处理

糜棱岩图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, 研究对象石英可以从图像中提取出来, 转换成矢量数据, 并计算出每颗石英颗粒的周长和面积。以类型 2 为例, 图 2a 是显微镜下糜棱岩类型 2 的原始图片。该图像可被转换到栅格图像, 并根据灰度值转换成等值线图。等值线图中, 灰度为 180 (图 2b) 的等值线能很好地圈定石英颗粒, 进而从图像中提取石英颗粒, 形成一幅代表石英颗粒的等值线图, 然后转换成一幅代表石英颗粒矢量图, 并精确计算出每颗石英的周长和面积。通过编辑, 可删除矢量图像不必要的数, 只保留与石英颗粒有关的数据, 其结果显示如图 2c。图像 2c 能叠加在图像 2a 上, 以显示与原图的差异。这个工作可循环进行, 直

到这 2 幅图像之间的差异可以忽略不计。用同样的方法, 可以处理其他类型糜棱岩的图像。

3 $P-A$ 模型与石英形态不规则性

$P-A$ 一般模型 (Cheng, 1995) 表达式如下: $P(>A) \propto A^{\frac{1}{2}D_{AP}}$, 其中, P 是石英颗粒的周长, A 是面积, \propto 代表“成比例”, D_{AP} 为幂函数的幂指数。要确定针对 $P-A$ 分形维数 D_{AP} , 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_{AP} , 其表达式为:

$$\log P = \frac{1}{2} D_{AP} \log A + C. \quad (1)$$

其中, C 是一常数。 D_{AP} 可进一步表示为 $D_{AP} = 2D_P/D_A$, 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 $D_{AP} = D_P$, 模型 (1) 即是 Mandelbrot (1982) 提出的 $P-A$ 模型, 是模型 (1) 特殊表达式。动力变质作用的结果, 使矿物颗粒的形态变得不规则, 其 $D_A < 2$ 。这种情况下, $D_{AP} > D_P$ 。为确定矿物形态的不规则性, 可以用 $P-A$ 模型的通用表达式, 即表达式 (1)。通常

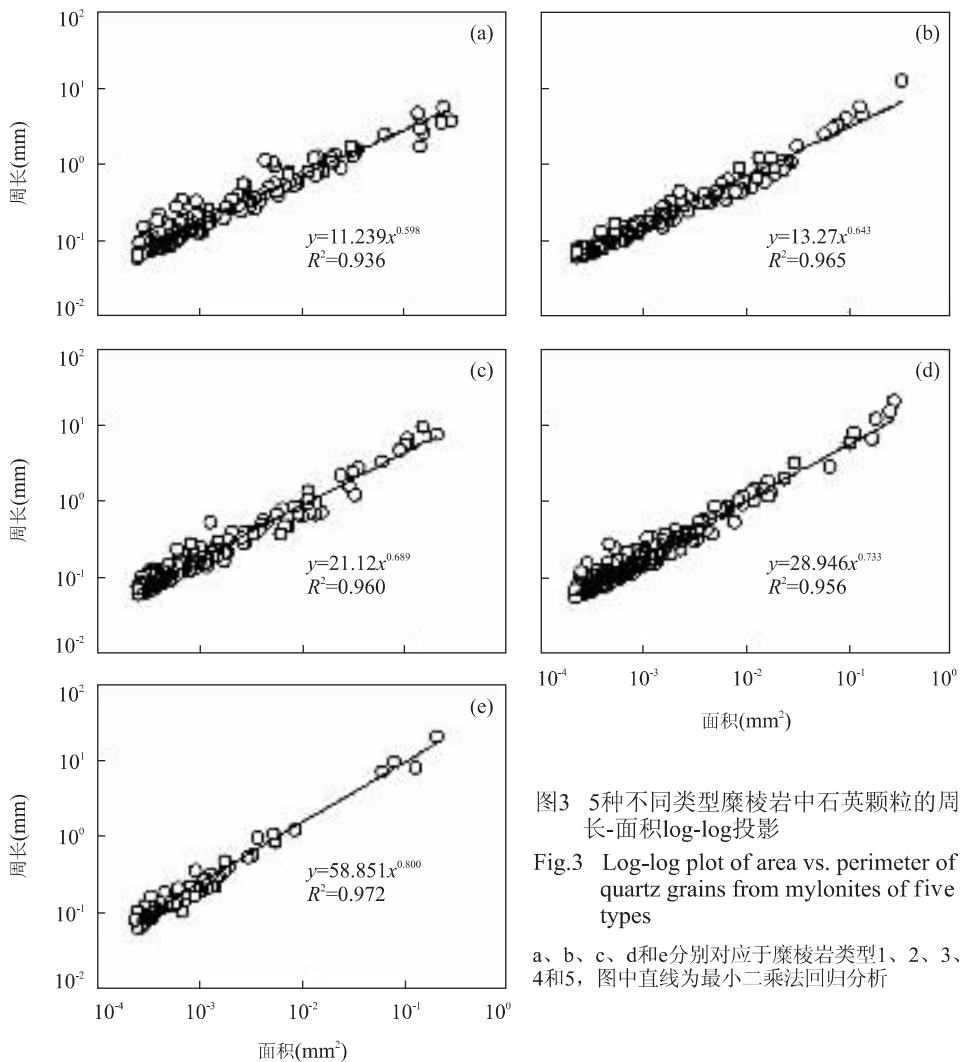


图3 5种不同类型糜棱岩中石英颗粒的周长-面积log-log投影

Fig.3 Log-log plot of area vs. perimeter of quartz grains from mylonites of five types

a、b、c、d和e分别对应于糜棱岩类型1、2、3、4和5，图中直线为最小二乘法回归分析

情况下, $1 < D_{AP} < 2$. 如果 $D_{AP} = 1$, 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_{AP} 愈大, 断面也愈不规则. 如果 $D_{AP} = 2$, 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. 由于石英属于六方晶系, 没有变形的正常石英岩中石英颗粒断面近圆形, 不同大小石英颗粒具有相似性, 其周长和面积之间呈幂函数关系, D_{AP} 应趋近 1. 然而, 糜棱岩中石英颗粒常发生强烈变形和重结晶, 形状变得不规则, D_{AP} 往往大于 1, 而趋近 2. 因此, 可以用分形维数 D_{AP} 趋近 2 的程度度量石英颗粒的不规则性, 即 D_{AP} 愈趋近 2, 颗粒愈不规则.

应用 $P-A$ 模型, 将计算出的石英颗粒周长和面积数据投影在一个 log-log 图解上(图 3). 通过最小二乘法, 可计算石英颗粒的周长-面积的斜率, 进而计算出分形维数. 从图 3a-e 可以看出, 面积和周长

之间存在明显的幂次关系. 相关系数 R^2 均大于 0.93, 表明线性相关性均较好. 从类型 1 到类型 5, 对应的 D_{AP} 值分别地从 1.20、1.28、1.38、1.46, 增加到 1.60, 逐渐趋近 2. 由于所有 D_{AP} 值都大于 1, 它表明石英的周长和面积之间存在分形关系. 从糜棱岩类型 1 到类型 5, 变质程度逐渐加强, D_{AP} 值逐渐趋近于 2, 它表明石英的形态被变得越来越不规则或越来越复杂, 这与图 1a-e 中可观察到的是一致的.

4 结论和讨论

糜棱岩的形成改变了原组成矿物颗粒形态、大小和数量, 即随动力变质程度的增加, 石英矿物颗粒形态变得不规则, 粒度变小, 数量增加. 基于 GIS 的 $P-A$ 模型能定量地表示变质程度不同的糜棱岩中石英颗粒形态的变化特征. 石英颗粒形态的分形维

数分别从 1.2、1.29、1.38、1.47, 增加到 1.60, 逐步趋近 2. 这表明石英颗粒形态由规则到不规则, 具有越来越复杂的变化趋势. 这与最初粒状石英的变形、伸长、分解和动态重结晶等在漫长时间发生在有限空间固体状态下有关. 以前的地质学家们常用颗粒长短轴比率来定量地表示颗粒的变形程度. 长短轴比率越大, 变形程度越大. 但是, 对于不规则的矿物颗粒, 难以获取长短轴比率的数据, 也不能用以度量形态的不规则程度. 而这些不规则程度又是与动力变质作用程度紧密联系的. 基于 GIS 的 $P-A$ 模型能有效地克服这些缺点, 并且用这一模型得到矿物的分形维数能作为新的指数, 定量度量矿物岩石的变形程度. 不言而喻, 这一模型也适用于其他的岩石学研究.

在撰写本文过程中, 陈守余教授审阅了初稿, 并提出了宝贵的修改意见, 在此致以衷心的感谢!

References

- Cheng, Q. M., 1995. The perimeter-area fractal model and its application to geology. *Math. Geol.*, 27(1): 69–82.
- Cheng, Q. M., 2003. Non-linear mineralization model and information processing methods for prediction of unconventional mineral resources. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(4): 445–454 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2004. Quantifying the generalized self-

similarity of spatial patterns for mineral resource assessment. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(6): 733–744 (in Chinese with English abstract).

- Gulbin, Y. L., Evangulova, E. B., 2003. Morphometry of quartz aggregates in granites; Fractal images reference to nucleation and growth processes. *Math. Geol.*, 35(7): 819–833.
- Law, R. D., Casey, M., Knipe, R. J., 1986. Kinematic and tectonic significance of microstructures and crystallographic fabrics within quartz mylonites from the Assynt and Eriboll regions of the Moine thrust zone, NW Scotland. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 77: 99–125.
- Mandelbrot, B. B., 1982. *The fractal geometry of nature*. W. H. Freeman, New York, 468.
- Zhang, Z., Mao, H., Cheng, Q. M., 2001. Fractal geometry of element distribution on mineral surface. *Math. Geol.*, 33(2): 217–228.

附中文参考文献

- 成秋明, 2003. 非线性矿床模型与非常规矿产资源评价. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(4): 445–454.
- 成秋明, 2004. 空间模式的广义自相似性分析与矿产资源评价. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(6): 733–744.