

# 多重分形与地质统计学方法 用于勘查地球化学异常空间结构和奇异性分析

成秋明<sup>1,2</sup>

(1. York 大学地球大气科学系, 加拿大多伦多 M3J1P3; 2. York 大学地理系, 加拿大多伦多 M3J1P3)

**摘要:** 勘查地球化学和地球物理场的局部空间结构变化性应包括空间自相关性以及奇异性。前者可通过地质统计学中常用的变异函数来实现; 后者可用多重分形模型进行刻画。具有自相似性或统计自相似性的多重分形分布(multifractal distributions)的奇异性( $\alpha$ )可以反映地球化学元素在岩石等介质中的局部富集和贫化规律。而多重分形插值和估计方法可以同时度量以上两种局部结构性质(空间自相关性以及奇异性), 因而, 它不仅能够进行空间数据插值, 同时还能保持和增强数据的局部结构信息, 这对于地球化学和地球物理异常分析和识别是有益的。应用该方法处理加拿大 Nova Scotia 省西南部湖泊沉积物地球化学砷等元素数据表明, 地球化学数据的局部奇异性在该区能够反映局部金和钨—锡—铀矿化蚀变带或岩相变化以及构造交汇等局部成矿有利部位。

**关键词:** 空间相关性; 局部奇异性; 元素富集与贫化; 多重分形。

**中图分类号:** P628<sup>+</sup>.1 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2383(2001)02-0161-06

**作者简介:** 成秋明, 男, 副教授, 1960 年生, 1994 年毕业于加拿大渥太华大学, 获博士学位, 现任加拿大 York 大学副教授, 主要从事数学地质、地理信息系统、矿产资源与环境评价的教学和研究。

在地质学尤其是勘查地质学中, 由点源数据形成连续变化的曲面来表达某种场的变化往往需要进行空间数据的插值或估计。各种地球化学和地球物理场是由不同地质过程的叠加作用所造成的。为了突出某些成分同时压制另一些成分的影响, 人们往往会对这些叠加场进行数值处理, 比如滤波等。多数情况下这些数值处理要对局部范围内的场值作滑动加权平均。插值和滤波的好坏直接影响到在此基础上对异常的分析 and 圈定结果。通常的数值插值方法比如普通反距离滑动平均方法(IDW)、克里格方法(Kriging)以及样条函数方法(Spline)等往往会对原始数值造成一定的光滑。这些方法的使用目的是为了体现某种趋势或者是为求某种平均估计结果, 如储量计算和参数估计等, 此时场值的局部变化以及局部结构特征并不重要。然而, 对于矿产勘查而言, 除场值的变化趋势以外, 场的局部变化性和空间结构信息对于识别异常的性质以及对异常的圈定是十

分必要的。这种局部变化性和空间结构信息往往反映一定的地质控制因素。例如, 由热液矿化蚀变所造成的岩石中成矿稀有元素的含量变化往往是不均匀的。相对而言, 由一般的岩浆活动、沉积和变质作用所引起的相应元素的变化是均匀的和尺度的。通常人们把异常的分布描述为面状异常、带状异常、线状异常、环状异常以及串珠状异常等。这种异常形态的分析往往对确定与异常有关的地质控制因素是有帮助的。对场的数值处理包括对异常的加强、分类及识别的主要目的也是为了帮助地质人员更有效地识别不同地质过程所造成的场, 从而达到识别与矿有关的异常并进行矿产预测的目的。本文要介绍的是如何采用一种新的综合空间统计和多重分形的处理方法来突出异常的局部变化性以及空间结构信息。与已有的各种统计(包括空间统计), 以及谱分析等方法所不同的是这种新方法不仅考虑了场值的空间相关和变化性(spatial correlation and variability), 而且还能够有效地度量场的局部奇异性(local singularity)。它对突出异常的局部变化特征和识别与矿

有关的异常具有较好的应用效果. 文中还将介绍该方法应用于加拿大 Nova Scotia 省西南部湖泊沉积物地球化学数据处理, 以及对金和钨—锡—铀矿化蚀变带或岩相变化及构造交汇等局部成矿有利部位的识别与圈定实例.

## 1 空间统计和多重分形

充分利用空间结构和局部变异信息已成为提高勘查地球化学、地球物理及遥感数据处理效果的重要途径之一, 尤其是对于以矿产勘查为目的的数据处理和异常分析, 如何保持和突出与矿有关的局部异常是数据处理和分析成败的关键. 变异函数常常被用于描述场的局部变异性和进行结构分析. 其他方法还包括高通滤波等. 应用这些方法可以突出一定尺度的局部变化性. 然而, 这些方法所忽视的是场的局部奇异性. 针对岩石中元素的含量来说, 局部奇异性所反映的是元素在地质过程中的富集和贫化规律. 由 Cheng<sup>[1]</sup>提出的多重分形插值方法不但可以度量这种局部奇异性, 同时还考虑了局部空间相关性. 采用这种方法不仅可以进行插值, 同时能够保持和突出场值的局部空间结构和奇异性信息.

### 1.1 空间相关性与空间统计分析

空间统计的发展是在传统统计基础上将空间关系引入了统计方法. 比如地质统计学方法将空间自相关性或变异性引入了统计估计和插值中. 这种空间自相关关系能够反映一定的空间结构和变异信息. 空间结构是指某种空间模式以及其变化规律. 由场所反映的空间结构往往受控于一定的地质因素和因素组合. 引入空间变化性是由传统统计向空间统计转变的基础. 尽管传统统计方法有时可以用于对空间结构和变化性的描述, 但其处理过程本身并不涉及空间信息. 近年来, 空间统计方法已被广泛地开发和应用于地球化学和地球物理数值处理和解释中. 例如地质统计学、空间因子分析, 以及滤波技术等的应用为异常的分析 and 识别起到了积极作用. 变量在一定距离内的统计相关性和变异性可由以下变异函数来度量

$$\gamma(x, h) = E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\}. \quad (1)$$

$\gamma(x, h)$  是位置和距离的函数. 它所度量的是相隔  $h$  距离内的两点场值的平均差异. 这种差异性与空间自相关性是呈反相关的. 可以看出, 这种变异性指标只能度量变量在一定尺度 ( $h$ ) 上对称的变异性和相

关性. 距离  $h$  可以是向量距离, 因此变异函数可以具有方向性. 这种变异函数可以用于多方向多尺度结构分析. 这在遥感以及其他图像处理中是有应用前景的<sup>[2]</sup>. 克里格方法是基于变异函数的一种空间插值方法<sup>[3]</sup>, 实质上是一种滑动加权平均方法. 它以空间变异性为原则进行加权平均, 因而不可避免对数据造成平滑. 这种方法对于类似储量计算或参数估计等是有效的. 对于异常的分析 and 识别来说, 局部变化信息的压制和抹杀往往会造成有用信息的丢失.

### 1.2 局部奇异性与多重分形方法

对空间相关性和空间统计方法的讨论表明, 相关性指数并不能反映元素的富集或贫化规律. 奇异性所度量的是场值随量度范围大小的变化规律. 比如对一块均匀的岩石样品而言, 元素在岩石中的平均含量与岩石样品的大小是相对独立的. 不论样品大小如何, 所分析的平均含量是基本相同的. 这样的情况是非奇异的或正常的. 然而, 岩石中元素含量是不均匀的, 那么所分析的元素含量将会与被分析样品的大小有关. 不同大小的样品会给出不同的平均分析值. 这样的性质称为奇异性. 从多重分形的角度来说, 多次活动的地质过程往往产生自相似场. 自相似性是指在改变度量尺度的条件下场保持相似形. 自相似性与自相关性是不同的. 自相似性具有几何空间性质, 而自相关性只具有统计意义. 自相似性可以由以下的指数函数来表达

$$\mu(\epsilon) \propto \epsilon^\alpha, \quad (2)$$

这里  $\mu(\epsilon)$  是一种基于尺度  $\epsilon$  的量或场, 比如元素在  $\epsilon \times \epsilon$  范围内的平均面金属量. 指数函数 (power-law function) 具有这样的优良性质: 改变变量的尺度而不会影响函数的类型.  $\alpha$  称为奇异性指数, 它确定了指数关系的变化性. 如果用元素平均密度取代面金属量, 式 (2) 中的指数关系将改写为

$$\rho(\epsilon) \propto \epsilon^{\alpha-2}, \quad (3)$$

元素平均密度与度量范围大小  $\epsilon \times \epsilon$  的关系表明, 只有当奇异性指数  $\alpha=2$  时 (2-D 问题), 平均密度才与度量范围的大小无关; 否则, 当  $\alpha>2$ ,  $\rho(\epsilon)$  随着  $\epsilon$  的减小而减小. 当  $\epsilon$  很小时,  $\rho(\epsilon)$  趋于零; 相反, 当  $\alpha<2$  时,  $\rho(\epsilon)$  随着  $\epsilon$  的减小而增加. 当  $\epsilon$  很小时,  $\rho(\epsilon)$  出现特高值或特异值. 就地球化学元素平均密度分布而言,  $\alpha=2$  反映某种平均的非奇异背景分布. 这种背景分布往往与面积性的地质体有关, 常常占据研究区的绝大部分范围. 当  $\alpha>2$  或  $\alpha<2$ , 则分别反映与局部地质因素有关的元素含量的贫化或富集等异常现

象.在对元素含量进行插值或滤波处理时应尽量保持局部奇异性,并突出这种局部奇异地段.本文要介绍的多重分形方法就是针对以上问题而提出的一种异常增强的方法.

## 2 地球化学奇异性分析和异常识别方法

众多的空间插值和滤波方法都基于对场值的某种滑动加权平均,

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{\Omega(x_0, \varepsilon)} w(\|x_0 - x\|) Z(x), \quad (4)$$

这里  $\Omega(x_0, \varepsilon)$  是围绕中心点  $x_0$ 、半径为  $\varepsilon$  的小滑动窗口.  $w(\|x_0 - x\|)$  是对在  $\Omega(x_0, \varepsilon)$  中与中心点  $x_0$  相隔  $\|x_0 - x\|$  距离的任意点  $x$  的加权函数. 它往往与距离呈反相关. 加权函数的选择除与距离有关外还与场的空间自相关, 以及对场的处理目的有关. 如果是插值和估计为目的,  $w$  的选择方法如反距离加权方法、克里格方法, 以及样条函数方法等只是基于空间相关并不涉及奇异性. 由 Cheng<sup>[4]</sup> 给出的多重分形方法将滑动平均关系表达为

$$\hat{Z}(x_0) = \varepsilon^{\alpha(x_0)-2} \sum_{\Omega(x_0, \varepsilon)} w(\|x_0 - x\|) Z(x), \quad (5)$$

这里  $\alpha(x_0)$  是  $x_0$  点处的局部奇异性指数. 可以看出, 以上表达式中不仅包含了空间相关性的成分, 而且具有度量奇异性的因子. 它具有这样的特点: 如果局部场是背景场和非奇异场,  $\alpha(x_0) = 2$ , 那么通过该方法所计算的加权平均值与通常的加权平均并无两样. 然而, 当处于含量富集地段而且局部场具有奇异性,  $\alpha(x_0) < 2$ , 该方法所得的结果将高于通常的加权平均结果. 否则, 当处于贫化地段,  $\alpha(x_0) > 2$ , 该方法所得的结果将低于通常的加权平均结果. 由此可见, 该方法有利于加强局部异常. 通常的加权平均方法只是该多重分形方法的特殊情况. 对于具有奇异性的地球化学场来说, 传统的统计方法是不适合的. 它们对少数奇异数据所反映的局部异常并不敏感. 然而对于勘查地球化学数据来说, 对少数具有奇异性样品的识别才真正具有预测找矿的意义. 这或许就是常规的统计方法不能有效地识别与矿有关异常的主要原因之一. 多重分形方法不仅能够度量统计分布<sup>[5]</sup>, 而且能够刻画场的奇异性、相似性和自相关性. 它将成为一种有效的数据处理和分析方法. 下面将以应用实例来说明该方法的应用效果.

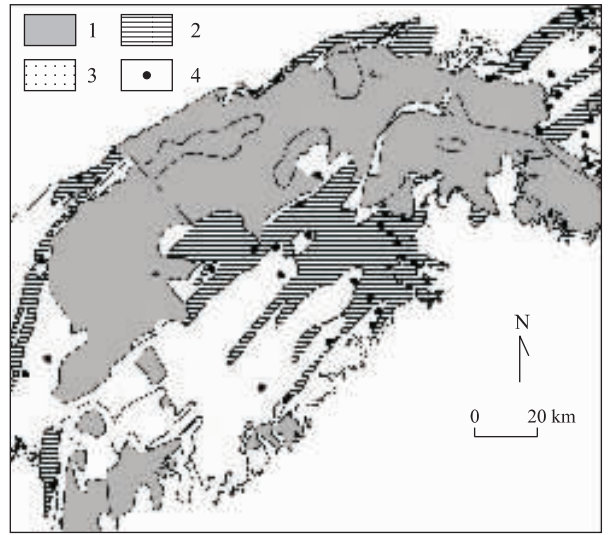


图1 加拿大北部 Nova Scotia 省西南部地区地质简图  
Fig. 1 Simplified geology of the southwestern Nova Scotia, Canada

1. 花岗杂岩; 2. Halifax 组浅变质碎屑沉积岩; 3. Goldenville 组浅变质碎屑沉积岩; 4. 金矿床和矿点分布

## 3 应用实例

该研究区位于加拿大北部 Nova Scotia 省西南部地区, 面积大约 4 000 km<sup>2</sup>. 区内出露的主要地质现象包括古生代浅变质碎屑沉积岩和晚期花岗质杂岩 (图 1). 古生代浅变质沉积地层遭受了强烈的北东向褶皱作用, 形成了一系列走向北东展布的平行褶皱构造. 北西向构造以断裂为主. 区内已经发现多处热液型金矿床和钨—锡—铀矿床. 金矿床和矿点主要分布在花岗杂岩体外的一定范围, 而钨—锡—铀矿化主要发生在花岗杂岩体内部. 这些矿床的分布均受褶皱或断裂构造的明显控制. 除此之外, 与金矿化和钨—锡—铀矿化有关的蚀变还分别受沉积岩相变化和花岗杂岩体内部岩相变化的影响. 这些局部的控矿条件往往会造成矿化有关元素在岩石以及地表介质中呈奇异性分布.

本文将采用多重分形方法对 1 948 个地表湖泊沉积物样品中砷元素的奇异性分布进行研究和异常识别 (样品取样位置见图 2). 砷元素无论在原生晕还是地表介质中都表现出与金矿化关系密切<sup>①</sup>. 与其他元素一起可用于识别与金和钨—锡—铀矿化有

① Xu Y, Cheng Q. A multifractal filter technique for geochemical data analysis from Nova Scotia, Canada. Journal of Geochemistry: Exploration, Environment and Analysis, 2001 (in press).

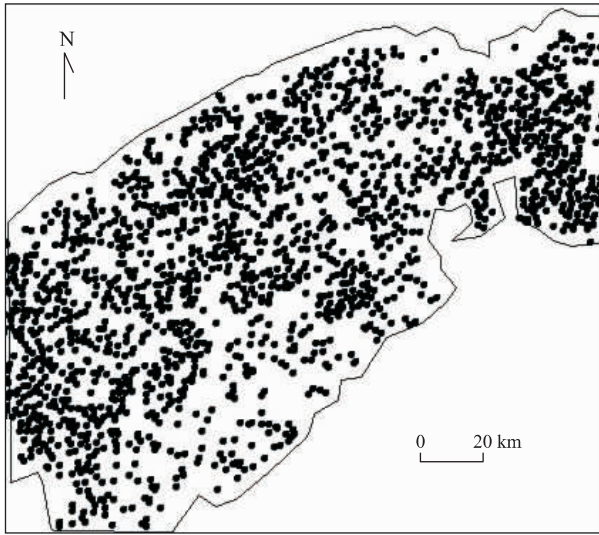


图 2 1948 湖泊沉积物取样点分布

Fig. 2 1948 lake sediment geochemical sample locations

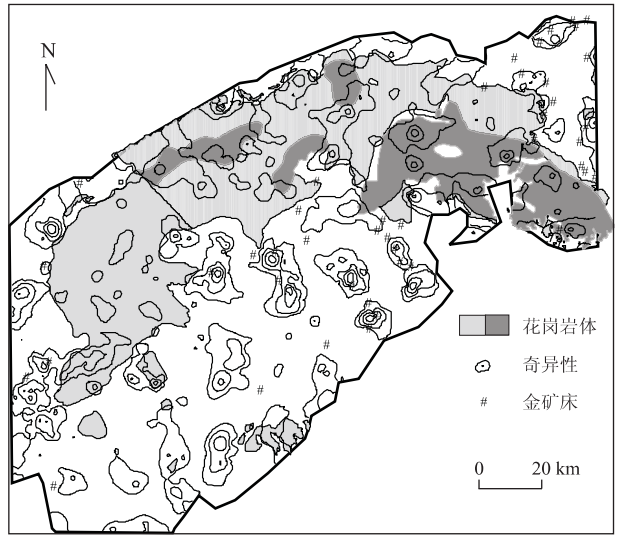


图 4 奇异性指数( $\alpha$ )的分布

Fig. 4 Distribution of singularity index ( $\alpha$ )

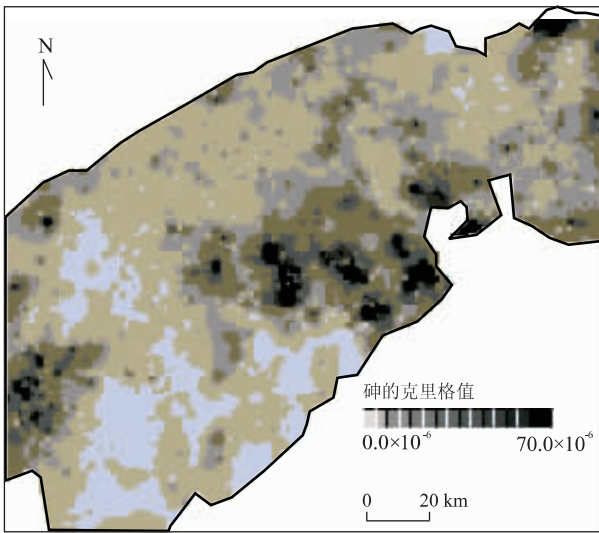


图 3 砷的克里格方法插值结果

Fig. 3 Kriging map of As

所采用的半变异函数模型为球状模型. 搜寻半径为 8 km

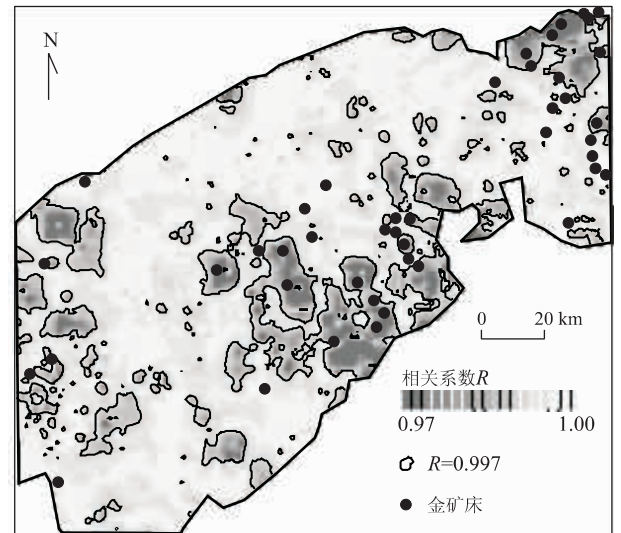


图 5 估计奇异性指数( $\alpha$ )所涉及的线性相关系数( $R > 0.97$ )

Fig. 5 Correlation coefficients involved in estimation of singularity index ( $\alpha$ )

关蚀变分布<sup>①②</sup>. 研究表明, 该区多种元素的分布(包括 As, Au, Pb, Zn 等)都具有多重分形特征(有关这方面的研究结果将另文发表).

为了对比由多重分形方法与克里格方法所得结果, 将这两种方法同时用于这 1948 个湖泊沉积物砷元素含量数据. 图 3 给出的是由普通克里格方法

得到的结果, 最大平均样品点个数为 16<sup>①</sup>. 高含量地段主要集中在研究区中南和西南部. 这些地段与已知金矿床和矿点的分布是相关的. 为了应用多重分形方法, 首先要计算局部奇异性指数. 为此可以定义多重分形测度( $\mu(\epsilon)$ )为单位面积内的面金属量, 即面积与元素平均密度的乘积. 采取边长分别为  $\epsilon = 3, 5, 7, \dots, 11$  km 的正方形来计算不同的测度值  $\mu(\epsilon)$ . 然后, 在双对数图上按指数关系估计每一点的奇异性指数  $\alpha$ (见图 4) 以及与之有关的最小拟合误差和相关系数(见图 5). 图 5 所给出的是每一点上

② Xu Y, Cheng Q. Identification of Sn-W-U mineralization-related granitoid intrusions and alteration by geochemical and radiometric data processing using GIS spatial analysis methods. Submitted to Journal of Economic Geology, 2001.



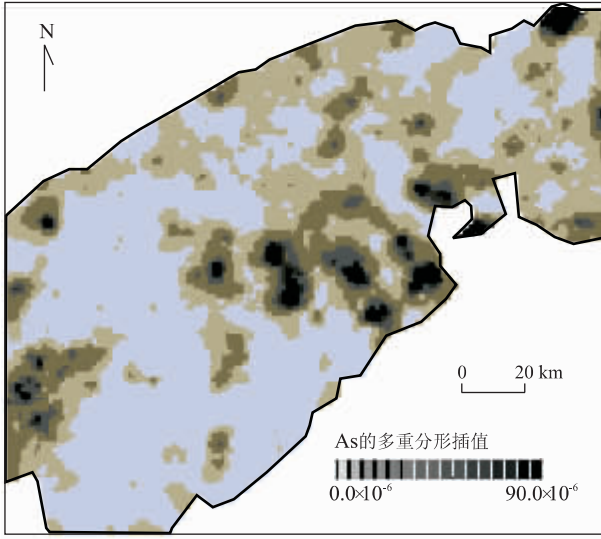


图 6 由多重分形方法所计算的砷的分布

Fig. 6 Results obtained using the multifractal interpolation method for As

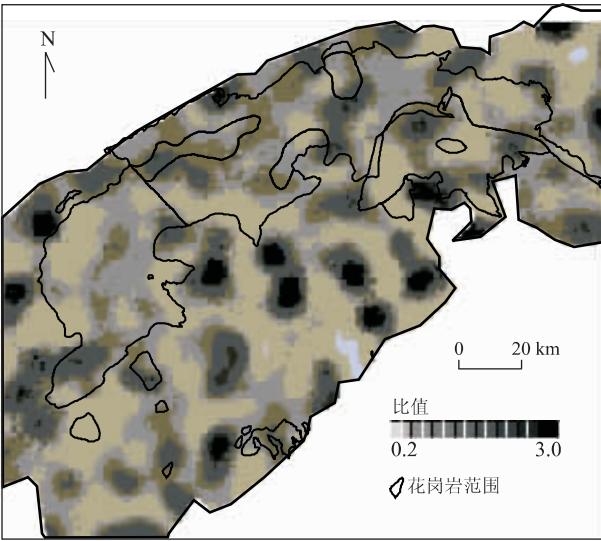


图 7 由多重分形方法和克里格方法所计算结果的比值

Fig. 7 Ratios of results obtained by the multifractal interpolation over the results by Kriging

$\ln \mu(\epsilon)$  与  $\ln \epsilon$  之间的线性相关系数。结果显示,所有相关系数均大于 0.97。可见,  $\mu(\epsilon)$  与  $\epsilon$  的指数关系是成立的。奇异性指数的估计是可靠的。图 4 显示了奇异性指数的分布与控矿地质条件,以及矿床分布的空间关系。可以看出,奇异性  $\alpha < 2$  或元素富集地段的分布位于花岗杂岩体之外金矿分布集中范围,或者处于岩体内部岩相变化以及构造交汇对钨—锡—铀矿化有利部位。由多重分形方法所得到的插值结果可见于图 6。为了对比多重分形方法与普通克里

格方法所得结果,图 6 与图 3 的比值可见于图 7。很明显,比值高的地段为那些具有奇异性的地段,也就是说,与克里格方法相比,多重分形方法的应用可以增强矿化富集地段的信息。这样的元素局部富集地段往往分布局限,且呈线性规律,而这些与矿有关的空间信息在克里格图上是没有明显反映的。

### 4 结论

与传统统计方法相比,多重分形方法不仅能够度量场的空间统计性质,而且可以刻划局部异常的奇异性规律。对处理地球化学场而言,局部奇异性往往反映矿化元素的富集( $\alpha < 2$ )或贫化( $\alpha > 2$ )规律。文中介绍的多重分形方法将空间相关系数与局部奇异性指数有机地结合起来。因此可以突出局部矿化有关信息。对加拿大北部 Nova Scotia 省西南部与金和钨—锡—铀矿化蚀变有关的地球化学异常识别的应用实例表明,该方法的应用对于增强和识别与热液矿床有关的局部异常是有效的。该方法还可作为一种有效的图像处理方法被广泛使用。

### 参考文献:

[1] Cheng Q. Multifractal interpolation [A]. In: Lippard S J, Naess A, Sinding-Larsen R, eds. Proceedings of the Fifth Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology [C]. Trondheim, Norway: [s. n.], 1999. 245~250.

[2] Herzfeld U C. A method for seafloor classification using directional variogram, demonstrated for data from the western flank of the Mid-Atlantic Ridge [J]. Mathematical Geology, 1993, 25(7): 901~924.

[3] Journel A G, Huijbregts C H J. Mining geostatistics [M]. New York: Academic Press, 1978. 600.

[4] Cheng Q. Interpolation by means of multifractal, kriging and moving average techniques [A]. In: Proceedings of GAC/MAC meeting GeoCanada2000 [C]. Canada: Geological Association of Canada, 2000.

[5] Cheng Q. Multifractality and spatial statistics [J]. Computers & Geosciences, 1999, 25(9): 949~961.

# MULTIFRACTAL AND GEOSTATISTIC METHODS FOR CHARACTERIZING LOCAL STRUCTURE AND SINGULARITY PROPERTIES OF EXPLORATION GEOCHEMICAL ANOMALIES

Cheng Qiuming<sup>1,2</sup>

(1. Department of Earth and Atmospheric Science, York University, Toronto M3J1P3, Canada; 2. Department of Geography, York University, Toronto M3J1P3, Canada)

**Abstract:** Spatial textural analysis of exploration geochemical and geophysical data includes spatial association and singularity. Spatial variability and association can be measured using variogram, which has been commonly used in geostatistics. The singularity can be analyzed in multifractal modeling. Singularity in the application to geochemical data can reflect the regularity of enrichment and dispersion of elements due to mineralization. The method introduced in the paper can take into account both spatial variability and singularity in data estimation and data interpolation. It can be used to conduct data interpolation as well as retain local texture information, which is essential for analyzing and interpreting geochemical data for mineral exploration. The case study of identification of Au and Sn-W-U mineralization-related alterations from lake sediment geochemical data in the southwestern Nova Scotia, Canada, has demonstrated that the singularity exponent involved in the multifractal interpolation method may characterize the alteration or other local areas favourable for mineralization.

**Key words:** spatial correlation; local singularity; enrichment and dispersion of element; multifractal.

\*\*\*\*\*

(上接 134 页)

四方面 10 类 64 个学科(附表). 附表中,原学科中单列的有序号 5,6,21,从实验地质学、矿床学、勘查地质学中新列出的有 24~27,39,40,43~52,56~60 共 21 个,另新列出的有 4,7~11,17,20,23,30,34~37,61~66 共 21 个. 附表中所列仅为地质科学现状的概略情况. 中国地质科学的学科名称和分类,将

随着科学的发展不断地得到补充与修改.

**参考文献:**

- [1] 路甬祥. 谈我国跨世纪知识创新的布局[J]. 瞭望, 1998, (33): 24~26.
- [2] 柴育成,姚玉鹏,田兴有,等. 地质学学科资助格局及主要进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(1): 65~69.