

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

分形布朗运动与地球化学测量

——地壳中元素含量空间分布的定量表征

李长江 麻士华 朱兴盛 胡永和

(浙江省地质矿产研究所,杭州,310007)

内容提要 地球化学面的形态是依赖于采样网格(采样密度)大小变化而不确定的。对于一维情况,元素含量分布曲线长度 L 与采样间距 r 之间的关系服从 $L(r) = Cr^{1-1/H}$, $D = 1/H$ 。对于地壳上任一给定区域,沿某一测线进行地球化学测量的任一元素含量数据,由上式确定的 D 值和 H 值,对于沿测线方向该元素的含量分布在统计的意义上将是确定的。对浙江省水系沉积物测量数据的统计结果表明, Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Mo、Co、Ni 8 种元素的含量变化在 1~150 km 尺度范围内遵循分形分布, $D = 1.03 \sim 1.62$, $H = 0.62 \sim 0.97$ 。这表明地壳中元素含量在空间上随采样间距的变化可能是一个完全等价于分形布朗运动的随机函数,在 1~150 km 这个尺度范围内,元素含量分布模式具有自相似性和长程相关性。这个结果为“国际地球化学填图”项目(IGCP259)提出的 160 km × 160 km 采样网格尺度提供了一种理论的支持。

关键词 地球化学测量 分形布朗运动 元素含量空间分形

英国海岸线有多长?这是 Mandelbrot^[1]在美国《Science》上发表论文中提出的。分形思想由此萌芽生长。这篇文章的结论令人惊诧:海岸线的长度是不确定的,它依赖于测量时使用的尺度。因为海岸线是弯曲的,而每个弯曲中又包含更小的弯曲。用不同长度的直尺去测量海岸线,所得长度不同。Mandelbrot^[1,2]发现海岸线的长度 L 与测量步长 r 之间存在以下关系:

$$L(r) = Cr^{1-D} \quad (1)$$

这里, C 是常数, D 是分维数,它定量刻画了海岸线曲折的复杂程度。 D 越大,表明海岸线变化越曲折。每条海岸线都有一个特定的 D 值。最近,国内学者将分形思想用于构造地质学和矿床学研究取得了一些成果^[3~6]。

地壳中化学元素的含量的空间分布构成了三维空间中的一个曲面,称之为地球化学面(geochemical surface)。李长江等先前的研究^[7]揭示了地球化学景观可能是一个具有低维($D_2 \approx 2.9$)吸引子的混沌系统,地球化学面是极其粗糙而非处处可微的。在地球化学测量中,对地球化学面的形态,即元素含量空间分布的了解,是通过一定的采样密度(采样间距)采集的样品数据来确定的。面是由线所构成的,对于一个给定的采样区间,其元素含量曲线的长度是随采样间距而变化,亦即并非确定的。由此可知由曲线所构成的地球化学曲面也是不确定的。这说明关于地壳中元素含量的空间分布如同海岸线长度一样,也是依赖于观察尺度(采样间距)的大小而变化的。然而,元素含量数据的一个显著特征是它与采样点的空间坐标有关,即不仅

注:本文为地质矿产部百名跨世纪科技人才培养计划资助研究(编号 9613)的部分成果,并得到浙江省自然科学基金(编号 496003)的资助。

本文 1998 年 2 月收到,8 月改回,章雨旭编辑。

随采样间距而且也随采样点的不同,元素含量会发生极不规则的变化。这说明元素含量在空间上的变化可能是一个完全等价于分形布朗运动^[8]的随机函数。因此,分形可能为定量刻画地壳中元素含量的空间分布提供了一种新的有效方法,分形布朗运动或许将成为一个能描述地球化学测量过程以及揭示元素含量空间分布性质的数学模型^①。

Bölviken 等^[9], Qiuming Cheng 等^[10,11]先后研究了地球化学图上含量等值线、等值线封闭区的周长-面积以及面积-含量的分形关系,并取得了一些有意义的结果。然而,除了 Bölviken 等^[9]曾在分形布朗运动定义的前提下,研究了一些元素含量的平均变差(增量均方差)与采样间距的分形关系以外,迄今为止人们所讨论的主要是某个确定的采样密度(样点分布间距)下元素含量空间分布形态的分形问题。显而易见,对于同一地区,当采样密度不同时,元素含量空间分布的形态往往不同,关于其形态的分维数值可能也不同。

Xie Xuejin 等^[12]指出,随采样密度的不同,人们将观测到局部、区域、省以及巨省等不同尺度规模的地球化学异常模式的过程,正是类似于 Mandelbrot 用他的“尺子”对海岸线长度进行测量的过程。我们认为只有从更广泛的意义上揭示了在元素含量空间分布与采样间距之间存在分形关系,才可能为元素含量在空间分布上是否具有统计上的标度不变性提供一个根本性的说明。如果这种关系存在,那么对于地壳上任一给定区域,通过对有限样品数据的分形分析,所获得的分维数 D 对于该区域地壳中某一元素的含量分布从统计上来说将是确定的。这对于在勘查地球化学中合理地选择采样密度以及对数据进行模拟可能是十分有价值的。同时,也将导致人们从更深刻的意义上认识地壳中元素含量的空间分布规律。本文研究的目的在于此。

1 地球化学面与采样网格

地壳中化学元素的含量分布显示了不同尺度规模的不均匀性,这已是一个众所周知的事实。Xie Xuejin 等^[12]总结了从局部到全球不同尺度规模的地球化学异常模式。在全球范围内,存在线性规模可达 $10^5 \sim 10^6$ m 以上富集某种(些)元素的地球化学省(但同时也往往可能贫于另一种或一些元素)。在地球化学省内,又往往存在若干线性尺度达 $10^3 \sim 10^4$ m 的区域性地球化学异常。在一个区域地球化学异常区中,通常又存在一些线性尺度为 $10^2 \sim 10^3$ m 的局部异常。甚至在一个 10^{-3} m 大小的矿物晶粒中,微量元素的含量分布也可能是极不均匀的。因此,地壳中化学元素含量呈不均匀分布是一个普遍现象。

图 1 是根据浙江省水系沉积物测量结果绘制的银的三维地球化学图。图中水平坐标表示经纬度,纵坐标表示银含量。由该图可知,如果把银的含量分布看成是三维空间的一个曲面,则这个地球化学面是凹凸不平的。图 1 中的数据的数据的采样密度为 $1/(4 \text{ km}^2)$,亦即图 1 给出的地球化学面是由每 4 km^2 一个样品的银含量数据所确定的。如前所述地壳中元素含量分布是不均匀的,因此,如果采样网格尺寸大于或小于 4 km^2 ,即采样密度减小或增大,得到的地球化学面将会比图 1 简单或更加复杂。为了证明这一点,让我们考虑一维的简单情况。图 2 是浙江治岭头金银矿床矿脉的金含量变化曲线。曲线 a、b、c、d、e 的采样间距分别为 5 m、10 m、20 m、40 m 及 80 m。从图 2 可知,随样点间距减小,金的含量曲线越来越曲折复杂,更多的含量变化细节被揭示出来,同时曲线长度增大。一般,对于一采样区间,有 m 个取样点(即 $k=1, 2, \dots, m$)。若固定始末两个样点,任意增加或减少区间内的样点数(减小或增大采样间距),那么由 m 个采

① 有关分形布朗运动模拟地球化学面的问题,作者将在另一篇文章中给出专门的论述。

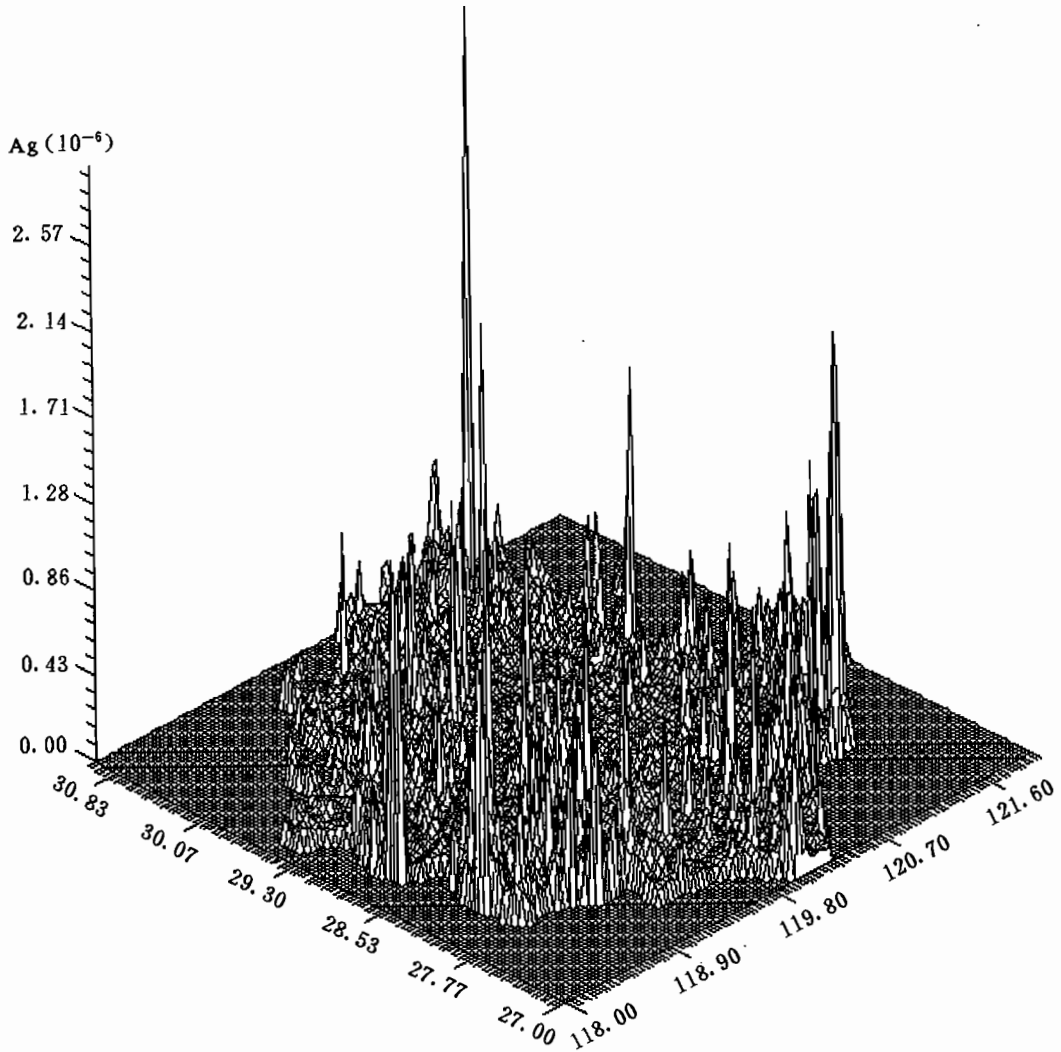


图1 浙江水系沉积物银的三维地球化学图

Fig. 1 Three dimensional geochemical map of Ag from stream sediment samples in Zhejiang Province

样点得到的元素含量曲线长度,比通过 $m-i$ ($i=1,2,\dots,m-2$) 个样点得到的含量曲线长度要长,揭示的含量起伏变化要多,比通过 $m+i$ 个样点得到的含量曲线长度要短,揭示的含量起伏变化要少。这表明,当以一系列递减的间距对一采样区间进行采样,如果采样间距可以减小到矿物颗粒(10^{-3} m)或更小,那么元素的含量曲线长度似乎就趋于无穷大,并具有无限的含量变化细节。这表明了元素含量曲线长度或其复杂性是采样间距的函数,换言之,在采样区间,沿某一条测线元素含量在空间上随采样间距的变化可能是一个完全等价于分形布朗运动的随机函数。

在地质和地球化学测量或其他的任何地质勘查中,人们总是按一定大小的采样网格或间距来取样,并通过对样品的元素含量的分析研究来了解元素含量在空间上的分布状况——地球化学面形态。面是由线所构成。因此,从上面的讨论可知,对于一个给定的采样区域,其地球

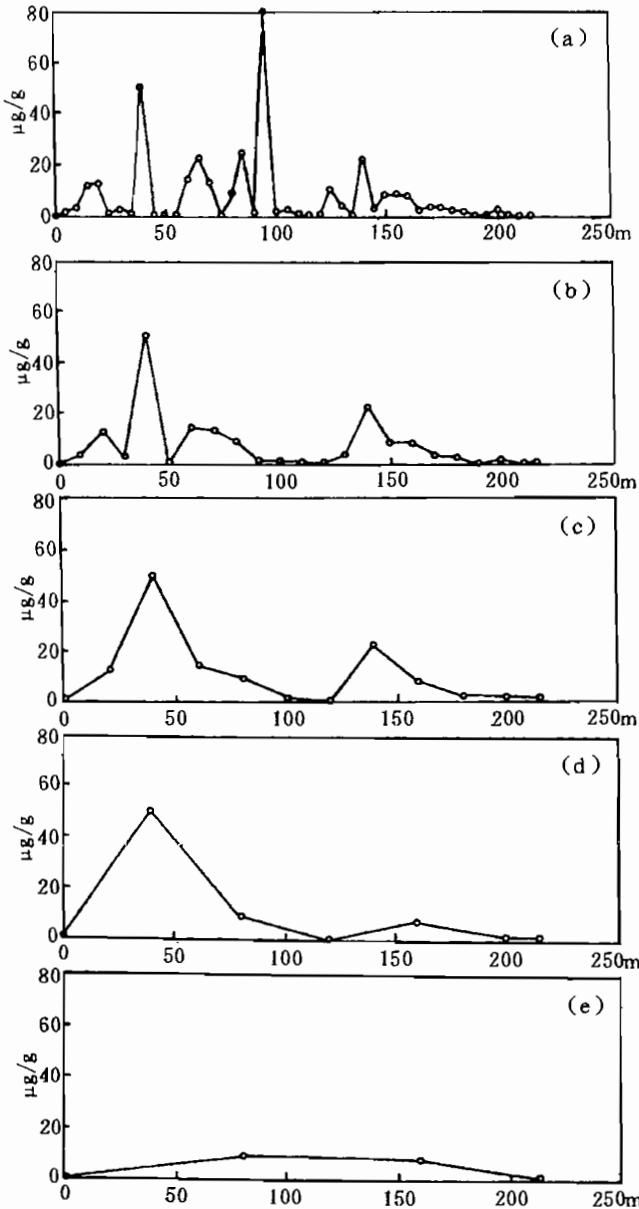


图 2 浙江冶岭头金银矿床东块段 48~52 线 YD 矿体金含量变化曲线

Fig. 2 Showing relation between the variation of Au content and the sampling interval in YD ore body (from Line No. 48 to Line No. 52) East-segment, Zhilintou gold-silver deposit, Zhejiang Province

取样间距: a—5 m; b—10 m; c—20 m; d—40 m; e—80 m

Sampling interval: a—5 m; b—10 m; c—20 m; d—40 m; e—80 m

化学面也是依采样网格(采样密度)的大小变化而不可能得到某一定值。

2 实测点数据与元素含量空间分布的分维数

分形布朗运动(FBM)是 Mandelbrot 和 Van Ness^[8]首先提出的,用于模拟各种具有分形特征的噪声等,现已成为一个能反映广泛的自然特征的数学模型。如果定义某个随机函数 $B(t)$ 为分形布朗运动,则有 $B(t + \Delta t) - B(t)$ 满足概率条件:

$$P\left[\frac{B(t+\Delta t) - B(t)}{|\Delta t|^H} < x'\right] = F(x') \quad (2)$$

其中, Hausdorff 测度 H 是一个常数。当 $F(x')$ 为零均值, 单位方差的高斯分布时, 且 $0 < H < 1$, 那么这种过程就叫作分形布朗运动。分形布朗运动是自

仿射分形的, $B(t)$ 的变化随 $\Delta B = \Delta t^H$ 而缩放。当 $H = 1/2$ 时, $B(t)$ 就是一般的布朗运动。 $B(t)$ 具有下列两个性质:

- (1) $B(t_2) - B(t_1)$ 服从高斯分布;
- (2) $E\{[B(t_2) - B(t_1)]^2\} \propto |t_2 - t_1|$

这里 $E\{\}$ 为期望值, 即均值。由 $B(t)$ 形成的图形的分维数:

$$D = E - H \quad (3)$$

其中, E 是图形所在空间的拓扑维, 对于分形曲线和分形表面, E 分别为 2 和 3。由式(2)及分形布朗运动的性质可得到^[13]:

$$\gamma(r) \propto r^{2H} \quad (4)$$

这里, $r = |x_i - x_j|$, 为采样点间距; $\gamma(r) = E\langle [Z(x_i) - Z(x_j)]^2 \rangle$, 其中 $E\langle \rangle$ 为期望值, 即均值, $Z(x_i)$ 是 x_i 点的元素含量。分维数 D 与 H 的关系如式(3)所示。Bölviken 等^[9]对北芬诺斯坎迪亚 25 万 km^2 水系沉积物 21 种元素的 5773 个数据, 应用式(4)研究了元素含量空间分布的分形关系。他们发现其中 10 种元素 (Al, Ba, Ca, Fe, Li, Mg, Sc, Sr, V, Zn) 的 $\gamma(r)$ 与 r 之间的关系可以用式(4)进行拟合。另外 11 种元素 (Ag, Ce, Co, Cr, Cu, La, Mn, Mo, Ni, P, Zr) 则不遵循式(4)。Bölviken 等^[9]将此归因于这些元素的化学分析精度不够。或许如此, 但我们认为更可能的原因是, 就这些元素而言, 其 $Z(x_i) - Z(x_j)$ 不满足高斯分布。

根据分形布朗运动的定义, 如果分形关系式(4)成立, 需要 $Z(x_i) - Z(x_j)$ 服从高斯分布, 且 $E\langle [Z(x_i) - Z(x_j)]^2 \rangle \propto |x_i - x_j|$ 。对于实际的元素含量数据, 这通常需要有足够大的数据量, 或者在选择采样点上, 样品数据的 $Z(x_i) - Z(x_j)$ 幸运地满足了上述要求。然而, 在实际的地球化学测量中, 这往往是极为困难的。因为取样总是在有限的离散的位置进行。因此, 使用式(4)来处理实际的元素含量数据, 考察元素含量的空间分布与采样间距的关系是否为分形分布, 并非总是可行。尤其是, 当一采样区间的数据并不遵循式(4)时, 我们仍不能确定其抑或不是由于样品数据太少或样点的分布不够理想所致。因此也就不能认为在该区域内元素的含量在空间分布上未必不是分形分布的。下面我们将从另一个角度来导出元素含量空间分布与采样间距的分形关系。

对一维情况, 即沿一条测线采取样品, 设采样点的平均间距为 $r = \Delta x$, 样品的元素含量分析值为 $Z(x_i)$ ($i = 1, 2, \dots, m$)。记相邻样点元素含量值增量绝对值为 $\Delta Z = |Z(x_i + r) - Z(x_i)|$ 。如图 3 所示, 可以得到第 i 和 $i+1$ 个样点间元素含量曲线长度为:

$$\delta = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2} \quad (5)$$

由于元素含量呈非均匀分布, 所以随采样点的不同, ΔZ 会发生完全不规则的变化, 并且有 $\Delta z = 0$ 。对于一采样区间, 若给定采样间距和样品的元素含量数据, 其元素含量曲线长度 L 为:

$$L = \sum_i \delta_i \quad (6)$$

另一方面, 根据分形布朗运动理论, 典型的 $Z(x_i)$ 的变化随 $\Delta Z = \Delta x^H$ 而缩放, 且:

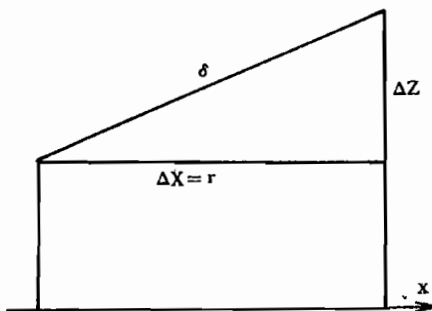


图 3 元素含量曲线长度与采样间距和含量变化关系示意图

Fig. 3 Sketch showing relation between length of element content curve, sampling interval and element content change

$$\delta \propto \Delta x \sqrt{1 + \frac{\Delta z^2}{\Delta x^2}} \propto \Delta x \sqrt{1 + \frac{\Delta z^2}{\Delta x^{2-2H}}}$$

δ 的个数为 $N = 1/\Delta x$, 在 $\Delta x \ll 1$ 的幅度上, 有 $\delta \propto \Delta x^H$, 于是 $N(\delta) \propto \delta^{1-1/H}$ 。从式(5)和(6)可知, 对于给定的采样区间当采样间距 $r = \Delta x$ 不同时, 元素含量曲线有不同的长度 $L(r)$ 。现在, 我们考虑用采样间距 $r = \Delta x$ 对 $L(r)$ 进行度量, 则有:

$$N(r) \propto r^{-1/H}$$

$$r \cdot N(r) \propto r \cdot r^{-1/H}$$

$$L(r) = r \cdot N(r) \propto r^{1-1/H}$$

或: $L(r) = C \cdot r^{1-1/H} \quad (7)$

这样, 通过与式(1)比较, 得到 $D = 1/H$ 。式(7)表示了对于任一给定采样区间, 元素含量曲线长度, 亦即元素

含量的空间分布与采样间距的关系。元素含量曲线如同海岸线一样,它的长度将随采样间距 r 的不同(同时 ΔZ 也不同)而变化。对于一个给定采样区间内的 m 个采样点,若固定始末两个样点,通过逐次去掉一部分样品,改变样点间距,使 $r_{i+1}=2r_i$ 。于是可以得到一系列不同的 r_i ,同时也由式(5)和(6)确定了相应的 L_i 。将 L_i 和 r_i 投在双对数坐标图上,如果两者关系呈一条直线,就说明了对该采样区间,在所采用的 r 范围内,元素含量在空间分布上是分形的。那么根据其斜率利用式(7)就可以得到该元素的含量在空间分布上的分维数 D 及 H 值。通过上述过程,对于地壳上的任一给定区域,从某一元素的含量空间数据得到的 D 值在统计的意义上将是确定的。对于具有相同尺度采样区间的不同区域,同种元素的 D 值可能不同。这个 D 值定量刻画了采样区间内元素含量在空间上的复杂程度, D 越大,说明元素含量在空间分布上的起伏变化越大,随采样间距的变化也越快。只要知道了 D 值,用一个指定的 r 就可以确定一个采样区间内元素含量曲线的长度,当 $r \rightarrow 0$ 时,有 $L \rightarrow \infty$ 。此时的 L 可以理解为给定采样区间内元素含量分布曲线的真值。

上面讨论的是一维情况下元素含量在空间分布上的分形性质。但是,如同一维的直线构成两维的欧几里得平面,地球化学面的分维数 D_2 与构成该曲面之曲线的分维数 D_1 之间关系为 $D_2=D_1+1$ 。一般,对于一个实际的研究区域,可以选定许多条相互垂直的测线,进行元素含量空间分布的分形统计,然后对所得到的分维数进行平均,以平均值来表示该区域元素含量分布的变化程度和分形性质。如果 $Z(x)-Z(0)$ 具自仿射的分形性质,则 $Z(x)$ 的相关函数为:

$$C(x) = \langle -Z(-x) \cdot Z(x) \rangle / \langle Z(x) \rangle^2 = 2^{2H-1} - 1 \quad (8)$$

从式(8)可知,若 $H=1/2$, 对应于通常的布朗运动,它具有独立的增量 ΔZ , 例如,对于 $x_1 < x_2 < x_3$, $Z(x_2)-Z(x_1)$ 和 $Z(x_3)-Z(x_2)$ 在概率论意义上是独立的,其相关系数 $C(x)$ 为 0。当 $H \neq 1/2$ 时,对于 $H > 1/2$, 这些增量间存在正相关系数。对于 $H < 1/2$, 则增量间是负相关的。对任意 x 都成立的这种长程的相关性,在地球化学勘查和矿产勘探中将可能具有极大的应用价值。例如,对于一已知的元素含量数据的空间序列,由式(7)计算出 H 值,若 $H \neq 1/2$, 那么根据其相关性,就有可能对该元素含量分布的空间序列的变化趋势作出预测和进行模拟。

图 4 是应用式(7)对浙江 1:20 万水系沉积物测量数据的 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Mo、Co、Ni 等 8 种元素进行拟合的结果,表明了这些元素含量的空间分布与采样间距之间的关系在 1~150 km 尺度范围内遵循分形分布,并且拟合的结果是非常好,相关系数均在 0.9~0.97 之间。然而,如图 5 所示,对于同样的元素含量数据,其 $\gamma(r)$ 与 r 之间的关系在双对数坐标图上并不呈现线性分布。这正如在前面的讨论中所指出的那样,使用式(4)对元素的含量数据进行拟合,有时对实际存在的分形分布关系却往往可能得到否定的结果。因此对于地壳中元素含量空间分布的分形描述,式(7)可能比式(4)更具有普遍的意义。

图 4 所示的 8 种元素的 H 值在 0.62~0.97 之间,均 > 0.5 , 表明这些元素含量的空间分布在 1~150 km 范围内具有一种很好的长程相关性(持久性)。元素含量在空间分布上存在分形分布或长程相关性的无标度区上限为 150 km, 这十分接近“国际地球化学填图”项目(IGCP-259)提出的 160 km \times 160 km 采样网格尺度。Bölviken 等^[9]应用式(4)对北芬诺斯坎迪亚 25 万 km² 测区内水系沉积物样品 10 种元素(Al、Ba、Ca、Fe、Li、Mg、Sc、Sr、V、Zn)含量数据进行拟合,获得的分形分布存在的无标度区上限为 100~200 km, 也比较接近 160 km 这个尺度。这是十分有意思的。

“国际地球化学填图”项目计划以 160 km \times 160 km 的格子作为采样单元,在全球采集约

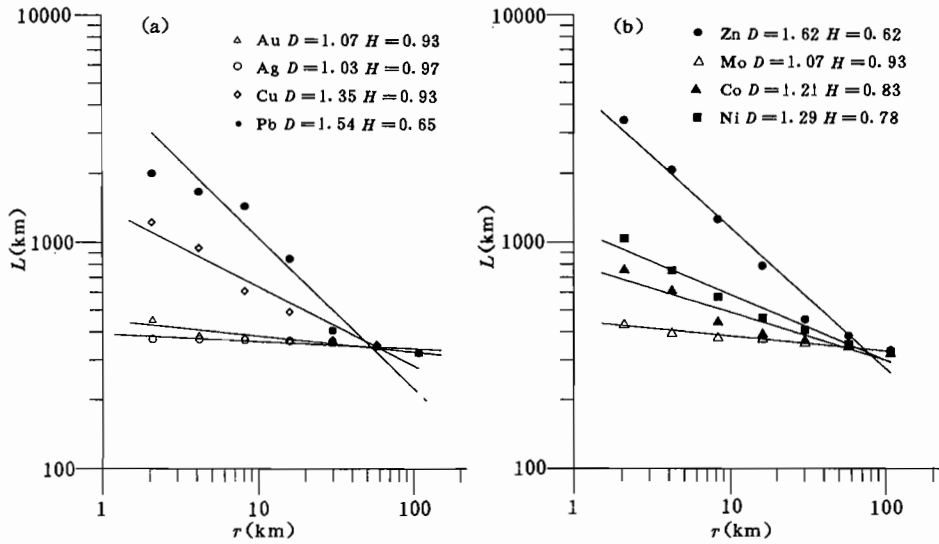


图4 浙江省1:20万水系沉积物测量数据(沿东经120°线)元素(Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Mo、Co、Ni)含量空间分布(L)与采样间距(r)的关系

Fig. 4 Spatial distribution (L) of elements (Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Mo、Co、Ni) content as function of sampling interval (r) in Zhejiang Province, stream sediment samples along 120°E (1:200000 scale survey)

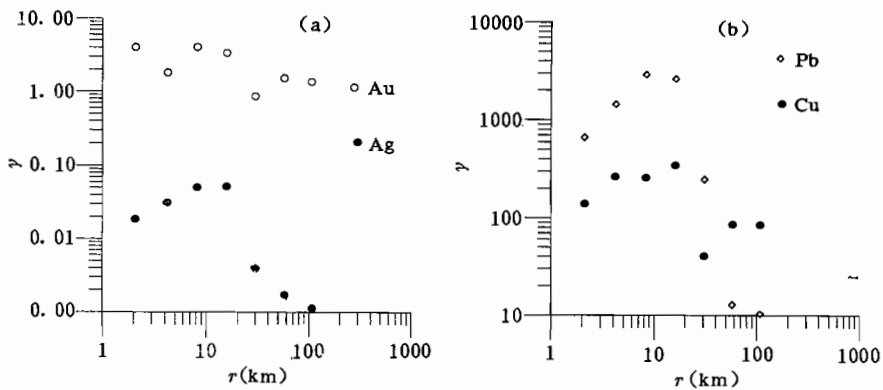


图5 浙江省1:20万水系沉积物测量数据(沿东经120°线)元素(Au、Ag、Cu、Pb)增量变异(γ)与采样间距(r)的关系

Fig. 5 Incremental variance (γ) of elements (Au、Ag、Cu、Pb) content versus sampling interval (r) in Zhejiang Province, stream sediment samples along 120°E (1:200000 scale survey)

5000个样品,以便在可望的未来制作出全球地球化学图,从而对世界大陆各种元素的分布有一个全局性了解^[14,15]。谢学锦率先在中国进行了这项试验,他领导的研究小组于1993~1994年间采集了覆盖中国大部分地区的529个泛滥平原沉积物样品(平均采样密度为每15000

km² 一个样^[15])。由这 529 个极低密度采样数据制作的地球化学图所显示的元素含量空间分布特征,与根据中国全国区域化探扫面计划(采样密度为每 1~50 km² 一个样)数以百万水系沉积物样品数据制作的地球化学图相当一致^[15]。这种一致性并非偶然。我们不知道“国际地球化学填图”项目的策划者当初关于以 160 km×160 km 作为全球地球化学采样单元的设想是基于什么而提出来的。但是,现在看来,以 160 km×160 km 的网格作为采样单元以及谢学锦的大胆试验所获得的极好结果是有其深刻理论背景的,那就是元素含量在空间分布上的分形性质和长程相关性质。换言之,在 1~150 km 左右的这个无标度区范围内,由于元素的含量分布模式具有自相似性和长程相关性,空间上大尺度的元素含量变化遵循与小尺度变化相同的分布,因此以极低密度的地球化学采样(采集某种合适的样品介质)完全可能揭示出元素含量空间分布的一些基本特征。正是基于上述的元素含量空间分布的长程相关性,笔者等^[16,17]发展了一种用于化探数据处理的非线性分析系统 NASSD(Nonlinear Analysis System for Spatial Data)。应用 NASSD 对谢学锦提供的 529 个泛滥平原沉积物样品的 Cu 和 Ag 数据进行空间插值,获得了能显示更细致(小尺度)含量分布特征的地球化学图,并且与中国实际已知的大型和超大型铜和银矿床分布非常吻合^[17]。

3 结论

(1)地壳中元素含量在空间上随采样间距的变化完全等价于分形布朗运动,因此对于地球化学面的模拟,分形布朗运动是一种恰当的数学模型。

(2)地球化学面的形态如同海岸线长度一样,是依采样网格(采样密度)大小变化而不确定的。对于一维情况,元素含量曲线长度 L 与采样间距 r 之间的关系遵循 $L(r) = Cr^{1-1/H}$,这是对量规维数的一种推广。

(3)根据本文对浙江水系沉积物样品数据的分形统计以及先前 Bølviken 等对北芬诺斯坎迪亚水系沉积物测量数据的分形统计,可以确定水系沉积物中元素含量在空间分布上呈分形分布的无标度区尺度为 1~200 km,并且 $H \neq 1/2$,这表明在上述尺度范围内,元素含量的分布模式具有自相似性和长程相关性,这为“国际地球化学填图”项目选择 160 km×160 km 的采样网格提供了一个理论依据。

参 考 文 献

- 1 Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain, statistical self similarity and fractal dimension. *Science*, 1967, 156: 636~638.
- 2 Mandelbrot B B. *The Fractal Geometry of Nature*. New York: W. H. Freeman. 1982.
- 3 孙岩, 万玲, 张喜慧, 勾佛义. 新疆塔里木北部地区压扭张破裂面分维数 D 值测算. *地质论评*, 1997, 43(2): 162~166.
- 4 金章东, 卢新卫, 张传林. 江西德兴斑岩铜矿田断裂分形研究. *地质论评*, 1998, 44(1): 57~62.
- 5 丁式江, 翟裕生, 邓军. 中国金矿床分布的分形研究. *地质论评*, 1998, 44(2): 188~193.
- 6 卢新卫, 马东升. 湘中断裂体系分维与锑矿分布. *地质论评*, 1998, 44(5): 542~546.
- 7 李长江, 麻士华, 徐有浪. 地球化学景观吸引子的发现及其意义. *浙江地质*, 1995, 11(1): 86~90.
- 8 Mandelbrot B B, Van Ness J W. Fractional brownian motion, fractional noises and applications. *SIAM Review.*, 1968, 10(4): 422~437.
- 9 Bølviken B, Stokke P R, Feder J, Jssang T. The fractal nature of geochemical landscapes. *Geochem. Explor.*, 1992, 43(2): 91~109.
- 10 Qiuming Cheng, Agterberg F P, Ballantyne B S. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Geochem. Explor.*, 1994, 51(2): 109~130.

- 11 Qiuming Cheng. The perimeter-area fractal model and its application to geology. *Math. Geology*, 1995, 27(1): 69~82.
- 12 Xie Xuejin, Yin Binchuan. Geochemical Patterns from Local to global. *Geochem Explor.*, 1993, 47: 109~129.
- 13 Voss R F. Fractals in nature: From characterization to simulation. in Peitgen H O, Saupe D. eds. *The Science of Fractal Images*. New York: Springer-Verlag, 1988. 21~70.
- 14 Darnley A G, Bjorklund A, Bolviken B, Gustavsson N, Koval P V, Plant J A, Steenfelt A, Tauchid M, Xie Xuejing. A global geochemical database for environmental and resource management. IGCP 259 Final Report. Earth Sciences UNESCO, 1995. 19.
- 15 谢学锦. 勘查地球化学的现状与未来展望. *地质论评*, 1996, 42(4): 346~356.
- 16 李长江, 麻士华, 徐有浪. EGCLTH 仿真系统——从 1: 20 万化探扫面数据得到 1: 5 万地球化学测量结果. *浙江地质*, 1996, 12(1): 93~94.
- 17 李长江, 麻士华. 化探数据处理的新技术. *地质找矿论丛*, 1997, 12(4): 57~64.

Fractal Brownian Motion and Geochemical Survey

— A Fractal Approach to the Spatial Distribution of Element Contents in the Crust

Li Changjiang, Ma Tuhua, Zhu Xingsheng and Hu Yonghe

(*Zhejiang Institute of Geology and Mineral Resources, Hangzhou, Zhejiang, 310007*)

Abstract

The pattern of geochemical surface, which varies with the size of sampling cells (sampling density), is undetermined. For the one-dimensional case, the relation of the length of the element content distribution curve L to the sampling interval r is $L(r) = Cr^{1-1/H}$ with the fractal dimension $D = 1/H$. For the element content data obtained from geochemical survey along a given line in a given area of the crust, the D and H values obtained from the formula will be statistically determined. The spatial distribution of Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Mo, Co and Ni contents in stream sediment samples from Zhejiang Province is a fractal distribution at scales from 1 to 150 km, having $D = 1.03 \sim 1.62$ and $H = 0.62 \sim 0.97$ respectively. It indicates that the content distribution of elements in the crust varying spatially with sampling intervals is essentially equivalent to the fractal Brownian motion's random function, and predicts that the content distribution of elements has a statistical self-similarity and long-range correlation at scales from 1 to 150 km. The result provides a theoretical support for the size of 160 km \times 160 km sampling cells suggested by the International Geochemical Mapping project (IGCP259).

Key words: geochemical survey; fractal Brownian motion; spatial fractal of element contents

作者简介

李长江,男,1951年生。1981年毕业于浙江大学地球科学系,硕士。现任浙江省地质矿产研究所总工程师、教授级高级工程师,从事矿产地质研究。通讯地址:310007,杭州市体育场路498号。