新技术·新方法

用空隙法识别矿化强度

赵 婕[1,2,3], 王庆飞[1,2], 张铎毓[3]

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京 100083;
2. 中国地质大学 岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室,北京 100083;
3. 中国地质大学 信息工程学院,北京 100083)

[摘 要]勘探槽中的矿化强度是由矿体品位分布决定,特别是高品位的积聚可以由空隙法量化显示。本文以中国山东省胶东金矿区上庄金矿为例,运用空隙法判定矿体的矿化强度,讨论各勘探槽矿化品位的空间分布。研究结果表明低空隙值一般反映大致均一的品位分布,而高空隙值则与大于边界品位的高品位值密切相关,同时,高空隙值的分布一般反映出的是发育较好的矿体,而反之,低空隙值的分布则反映出的是低品位的矿体或者是非矿体。一般来说,空隙值能反映出高品位空间积聚的程度,所以能够作为评价矿体矿化强度的一个潜力指标。且与传统矿化强度判别方法相比,空隙法除了能反映矿化强度以外,对矿体的空间分布也能如实呈现。

[关键词]空隙值 聚集分布 胶东
[中图分类号]P628 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2010)04-0733-08

Zhao Jie, Wang Qing-fei, Zhang Duo-yu. Identification of mineralization intensity using lacunarity analysis[J]. Geology and Exploration, 2010, 46(4): 0733-0740.

1 前言

在许多研究领域中,分维值可以被视作衡量空间结构和物理过程的复杂性和不均一性的参量。现在在各个层面运用分形来描述地质现象的空间复杂性也越来越受到人们的关注。Mandelbrot (1983)定义分形为"Hausdorff Besicovitch 维数严格大于拓补维数的集合。"分形也是自相似的例子,具体来说,一个系统,一个物体或是一组特征的空间行为都与尺度无关(Turcotte, 1997)。

但事实上,Mandelbrot (1995)提到只有分形维数对一组结构来说距离提供一套完整的特性还差很远。换句话说,不同的分形集合可以有同样的分形维数却呈现出完全不同的样子或结构(Dong, 2000; Mandelbrot, 1983; Voss, 1986)。作为量化结构或空间结构的第一步,Mandelbrot (1983)引入了空隙值用来描述拥有相同分维值的不同结构或者说描述有不同积聚分布的结构,具体来说就是用"空隙"的概念来量化衡量空隙大小分布以描述分形的一个性质,它能直观的向我们展现数据的空间分布。构建拥有相同分维值的不同分形集合,他们可能看起来完全不一样,这是因为他们的空隙不同。较大的空隙值意味着大的间隔或是一些积聚的点;较小的空隙值意味着间隔是更加均一分布的。也就是说,空隙值衡量的是几何结构移动不变性的偏差或者间隙(Gefen *et al.*, 1983)。自此之后,空隙值这个概念被延伸用来描述具有或不具有分形和多重分形的真实数据集(Plotnick *et al.*, 1996)。需要注意的是,一个事物在小尺度下是均匀的但在大尺度下可以是不均匀的。也就是说,空隙值是一个衡量空间复杂度或结构的尺度相关量(Plotnick *et al.*, 1993)。

计算空隙值的算法有许多,比如最大覆盖法,数盒子法,滑动窗口法和周期边界法(Gefen *et al.*, 1983; Lin and Yang, 1986; Allain and Cloitre, 1991; Feagin *et al.*, 2007)。其中最实用的应该是 Allain and Cloitre (1991)引入的滑动窗口法,它被研究者应用于许多不同领域,包括 Plotonick *et al.*, (1993)将它引入了生态学,Henebry and Hux(1995)将之应用于雷达影像分析。

矿床的空间分布是复杂且不均一的,所以对矿

[收稿日期]2010-03-24;[修订日期]2010-06-08;[责任编辑]郑 杰。
[基金项目]国家自然科学基金项目(编号:40572063),教育部跨世纪人才培养计划、111 工程(编号:B07011),高校长江学者和创新团队发展计划(PCSIRT)和中国地质大学(北京)大学生学术科技学术基金资助。
[第一作者简介]赵婕(1983 年-),女,在读博士,现主要从事数学地质研究学习,Email:dayinggezhuang@yahoo.com.cn。

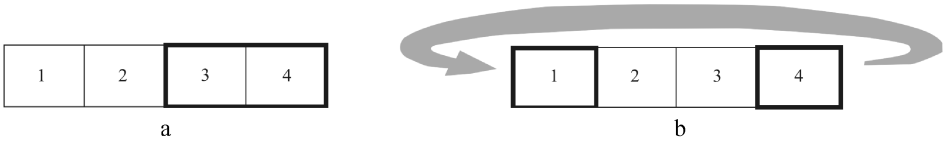

图 1 算法示意图

Fig. 1 Diagram showing algorithms

a-滑动窗口法;b-周期边界法

a-the standard lacunarity algorithm; b-the periodic boundary lacunarity algorithm

体的判定也是很困难的。为了解决这一困难,一些统计量被引入矿床研究中,其中一个就是空隙值。虽然空隙值能很好的反映出矿化强度,但是 Cheng (1997)指出当空隙法用在有限的数据上,它的结果会因为边界效应而有所偏差。Cheng (1997)也将滑动窗口法应用于多重分形模型,用一组函数推出了空隙值和多重分形之间的关系。他强调说空隙值高度依赖于维数。虽然维数本身不能决定空隙值,但它控制了分形模型,多重分形模型和一些非分形模型中空隙值的指数函数。维数越小,空隙值也越小。

矿化强度是反映品位变化程度的一个重要指标。可以通过整体品位的高低看品位的波动,如果波动相当的话就可以用平均值来衡量,但是在用平均值衡量时首先需要剔除异常值。此外矿化强度指数也是直接衡量矿化强度的一个指标。它是通过某地段(某工程、某块段、某中段等)品位与整个矿体的平均品位之比来确定的。这个比值称为矿化强度指数,其公式为:

式中:

$I_c = C_i/C$ I_c-矿化强度指数,C_i-矿体某地段平均品位,C-矿体总平均品位。

通过不同地段或不同中段矿化强度指数的比较,可以查明矿化强度在三度空间中的变化规律。

在金矿床勘探中,为了划出金矿体,顺着每个勘探槽连续取样且每个样品里的金含量被测定出来。则指示矿化强度的矿体的厚度和它的平均品位可以由试值计算得出。换句话说,勘探槽里的矿化强度是由大于边界品位的高品位的聚集程度(或者说是品位分布)决定的,那么,可以量化聚集分布的指标也是判别矿化强度的重要指标。到目前为止,空隙法还很少应用于地质学。相较于传统的衡量矿化强度的方法而言,空隙法则用到了空间中的每一个数据,所以用空隙法得到的信息更加完整。本文以上庄金矿矿床为例,计算了从不同勘探槽连续取样收集的数据的空隙值,意在判定高品位值的空间聚集度。

2 计算方法和解释

2.1 空隙值计算

空隙法不仅可以用于二值结构,也可用于一般数据(Plotnick *et al.*, 1996)。下面就来介绍关于这两种不同数据的空隙值计算方法。

当是二值时,数据集全是 0 和 1,所以窗口质量"S"就是 1 的个数。滑动窗口有序的在二值图像上一格一格往下移并且将每个相交的窗口质量都记下。这里用的计算二值图像的空隙值的方法是由 Allain and Cloitre (1991)提出的被 Plotnick *et al.*, (1993)加强了的滑动窗口算法。对于已知窗口大小 r,窗口质量为 S 的概率是

$$P(S,r) = \frac{n(S,r)}{N(r)} \tag{1}$$

式中:

$n(S, r)$是窗口大小为 r 质量 S 的个数,$N(r)$是窗口大小为 r 的窗口总个数。$E(S)$和 $E(S^2)$是

$$E(S) = \sum SP(S,r) \tag{2}$$

和

$$E(S^2) = \sum S^2P(S,r) \tag{3}$$

滑动窗口大小为 r 的空隙值 $\Lambda(r)$被定义为

$$\Lambda(r) = \frac{E(S^2)}{E^2(S)} \tag{4}$$

对于一般数据,设 M 为滑动窗口与数据集相交的总质量。现在考虑大小为 re $(r = 1, 2, \ldots)$的一维窗口在数据集内滑动。为了定义所有滑动窗口与数据集相交质量的分布,设 $n(M, r)$是大小为 re 质量为 M 的滑动窗口。将之除以总窗口数 $N(r) = (L/e-r+1)$,$1 < r < L/e$,L 是数据集的总长度,E 为欧几里德维数,当 $E=1$ 时则是一维,$E=2$ 时是二维问题,如此我们得到了滑动窗口大小为 re 质量 M 的概率函数 $P(M, r)$。也就是说

$$\sum_M P(M,r) = 1 \tag{5}$$

则

$$Z_Q^{(q)}(r) = \sum_M M^q P(M,r)$$
$$= \frac{1}{N(r)} \sum_M M^q n(M,r)$$
$$= \frac{1}{N(r)} \sum_i M_i^q(re) \qquad (6)$$

式中:

$Z_Q^{(q)}(r)$是 $P(M, r)$的 q 次矩。窗口大小为 r 的空隙值由一次和二次矩定义为(Allain and Cloitre, 1991)

$$\Lambda(r) = \frac{Z_Q^{(2)}(r)}{[Z_Q^{(1)}(r)]^2} \qquad (7)$$

重复这个计算当窗口大小不同时,窗口大小由 $r=1$ 一直增加到 l/e (一般为 $l/2e$)。

更好的理解空隙值的统计意义和它的图形形状,我们首先进行一些简单变换

$$Z^{(1)} = s(r) \qquad (8)$$
$$Z^{(2)} = s_s^2(r) + s^2(r) \qquad (9)$$

这里 s 是每个窗口内品位的平均值,而 $s_s^2(r)$ 是它的方差。所以

$$\Lambda(r) = 1 + \frac{S_s^2(r)}{S^2(r)} \qquad (10)$$

由此可以看出空隙值是方差/平均值的比率。

2.2　结果解释

更深入的讨论空隙值的意义,考虑两个序列 A 和 B,A 是规律分布的并且有明显的特征,当以大于品位距离的任何尺度来检验它时,序列的一部分和其它部分完全一致。也就是说,序列的展现形式与位置无关,这样的序列叫作移动不变性序列。这和序列 B 大相径庭,序列 B 的品位值都集中在一端,所以边上和中间部分看起来非常不一样,也就是说这个序列不具有移动不变性。我们注意到一个序列越是聚集得厉害,空隙就越大,也就更加不具有移动不变性。一般来说,一个事物的空隙值越大,它的移动不变性就越小(Gefen *et al.*,1983)。

从这点和检查图 6 和图 7 可以看出空隙值是一个这样的函数:

1)被占比率 i。当品位平均值 $Z^{(1)}$趋向零,空隙值 Λ 趋向无穷大。稀疏的序列比密集的序列的空隙值更大,这是因为稀疏序列的平均值更小。

2)滑动窗口的大小 r。一般来说,除了高度聚集的序列(例:序列 B),大窗口比小窗口更具有移动不变性。所以同一个序列,如果滑动窗口的大小增加则空隙值变小。当滑动窗口的大小是整个序列则方差为零,$\Lambda(l/e)=1$, 很明显,$\Lambda(r)\geqslant 1$,因为方差 $\sigma^2(r)\geqslant 0$, $\Lambda(r)=1$ 当且仅当 $\sigma^2(r)=0$ 时,这是在所有滑动窗口中 M 是个常数,并且 M 具有移动不变性,

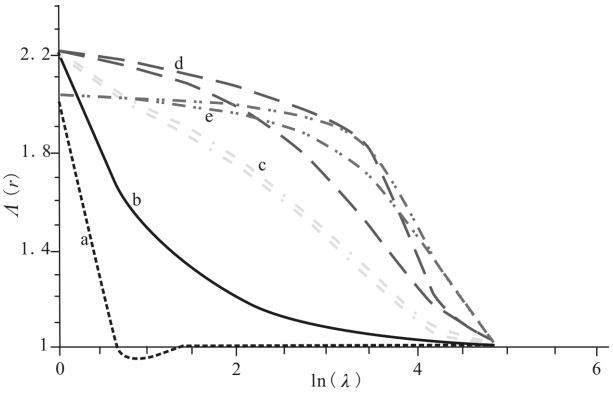

图 2　用滑动窗口法和周期边界法分别算出的五片土地的空隙值

Fig. 2　Lacunarity values of five pieces of land calculated by the standard algorithm and periodic boundary algorithms

a-非常均质;b-均质;c-过渡;d-异质;e-非常异质

a-limit-homogeneous; b-homogeneous; c-transitional; d-heterogeneous; e-limit-heterogeneous

这时空隙值达到最小值。相反的,如果图形都是有空隙的,则 $\sigma^2(r)>0$, 所以 $\Lambda(r)>1$。也就是说,这时空隙值衡量的是不具有移动不变性的集合。

3)序列的集合意义。已知 i 和 r,较大的空隙值意味着更加积聚的序列。对于 $r \ll l/e$,大多数窗口的质量要么很大要么很小。所以窗口质量的方差然后是空隙值比其它大小的窗口都要大。但一旦窗口大小能包含聚集的品位,则曲线急速下降。

2.3　边界效应

会产生边界效应是因为当大小为 r 的滑动窗口在数据集上移动,边界上的值会用得比较少,这是因为滑动窗口不能移动超过边界。这样在判断数据集的异质性时中间的部分占的比重更大。当滑动窗口的大小 r 相对于数据集来说较大时边界效应尤为严重。

周期边界法(Gaylord *et al.*, 1996)是一个减小边界效应消极影响的方法,因为它允许滑动窗口超过边界并绕回另一边。具体来说就是当滑动窗口到达边界,它们可以继续超过边界绕回到另一边。以一维图形举例来说,设窗口大小 $r=2$,当滑动窗口已经穿过了一整行到达边界后,滑动窗口的第一格占据数据集右边的最后一格,滑动窗口的第二格占据数据集左边的第一格(图 1)。滑动窗口被允许超越边界绕回到另一边。

数据集长度 $L = 4$,滑动窗口大小 $r = 2$,组黑

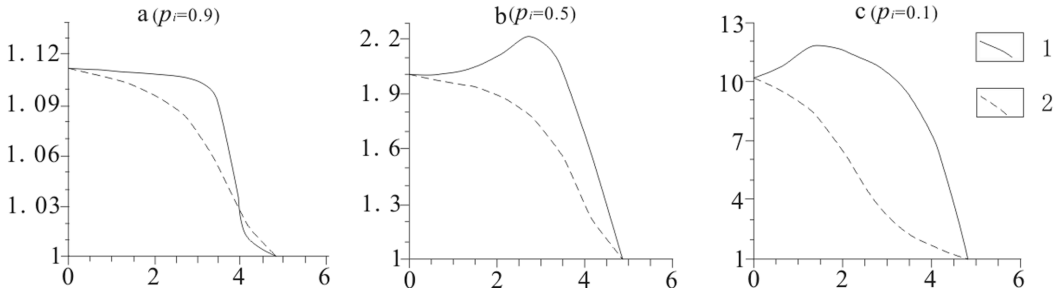

图 3 滑动窗口法和周期边界法的空隙值

Fig. 3 Lacunarity values by the standard algorithm and the periodic boundary algorithm

1-周期边界法;2-滑动窗口法

1-periodic boundary algorithm;2-standard algorithm

线框代表滑动窗口。在滑动窗口法图 1(a)中,最后一个被记录的窗口质量事实上是以第三行为参照点的;当滑动窗口在数据集上全部走了一遍,第二行和第三行比第一行和第四行算得多。在周期边界法图 2(b)中,当数据集的最右边被达到,滑动窗口可以绕回到另一边避免这个问题。在周期边界法中,最后一个被记录的窗口质量是以第四行为参考点的,它占据的是第四行和第一行的数据。

周期边界法使得数据取样是公平的且与边界和窗口大小 r 都无关。在滑动窗口法中 $i_{\max}=L-r+1$,而在周期边界法中只要数据集长度为常量,$i_{\max}$ 对于所有的 r 都是一样的。这使得频率分布 $Q(M,r)$ 和它们在等式(6)里面的矩在每个尺度下都包含同样数目的值。

Feagin (2007) 检验了两个算法的差异并得出边界效应确实影响了空隙值。一般来说,图形越异质两种算法的差异越大,事实上差异主要基于边界的覆盖率。边界覆盖率越高,两个算法的结果差异就越大(图 2)。在比较覆盖率 p_i 不同的图形时,当覆盖率很高时,边界效应最小,比如 $p_i=0.9$ 的图,而当覆盖率低时边界效应反而大,比如 $p_i=0.1$ 的图(图 3)。

边界效应在那些比较异质的图中更加强烈(图 2 中的 d 和 e),两个算法的结果也相差更大。所有的图都是 $L=256$ 的二进制且覆盖率约在 $p_i=0.5$ 左右,1 为黑,0 为白(Feagin *et al.*, 2007)。

图 3a 中,当 $p_i=0.9$ 时,两个算法的差异相对较小;图 3b 中,当 $p_i=0.5$ 时,两个算法的差异适中;图 3c 中,当 $p_i=0.1$ 时,两个算法的差异较大。p_i低时,边界效应更强。所有的图都是 $L=256$ 的二进制且覆盖率约在 $p_i=0.5$ 左右,1 为黑,0 为白(Feagin *et al.*, 2007)。

2.4 与多重分形的关系

设 $M(S)$ 是衡量集合 $S\subset R^E$ 的一个参量, $M_i(e)$ 是子集与大小为 e 的第 i 个小格相交的地方上的一个子衡量。这样大小为 re 的滑动窗口总的子测度可以被记为 $M_j(re)$。$M_j(re)$ 的矩可以表示为

$$Z^{(q)}(r)=E\{M^q\}\approx\frac{1}{N(r)}\sum_j M_j^q(re) \quad (11)$$

$M_j(re)>0$。只有当 re 很小时近似值才比较准确。等式(11)和分割函数 $\chi_q(re)$ (Cheng and Agterberg, 1995, 1996a)的差与 M^q 的平均数和数相关的,所以,

$$\chi_q(re)\approx\left(\frac{L}{re}\right)^E E\{M^q\} \quad (12)$$

对于多重分形参量 M, 对于变量 q 分割函数和 re 之间存在指数关系

$$\chi_q(re)\propto(re)^{\tau(q)} \quad (13)$$

于是合并等式(11), (12),(13) 我们有

$$Z^{(q)}(re)\propto(re)^{\tau^*(q)} \quad (14)$$

这里 $\tau^*(q)=\tau(q)+E$。需要注意的是如果 $\tau(1)\neq 0$ 或 $\tau^*(1)\neq E$,就需要变换 $\tau^*(q)=\tau(q)+\tau^*(1)$ (Cheng *et al.*, 1996b)。

由定义(7)和关系(14)我们可以得到

$$\Lambda(r)\propto(re)^{\tau^*(2)-2\tau^*(1)} \quad (15)$$

或是

$$\Lambda(r)\propto(re)^{-\tau} \quad (16)$$

这里 $-\tau=\tau^*(2)-2\tau^*(1)=\tau(2)-2\tau(1)+\tau(0)+[-\tau(0)-E]$ 并且 $-\tau(0)=D$ 是盒子维数,E 欧几里德维数且($D<E$)。

3 案例分析

本文以上庄金矿床为例,分别用滑动窗口法和

周期边界法计算了从各勘探槽连续取样的数据的空隙值,来判别高品位的空间密集度和边界效应所带来的差异。

3.1　地质概况和数据来源

上庄金矿床位于中国东部胶东半岛上的胶加金矿区。胶东金矿现在不论是从金矿产量(2000 年产量为 55t)还是金矿储量(中国国家金矿局未公布数据大于 900t)来说都是中国最重要的产金地。其中主要岩石类型为胶东组变质岩和燕山期花岗岩。主要的金矿体受北北东和北东走向的望儿山断裂带控制,该断裂带走向 25°~45°,向北西倾斜,倾角为 30°~40°。主矿带 1800m 长,2~4m 厚,延伸大概 750m 深。蚀变包括强烈硅化、绢云母化、硫化以及钾长石化。金品位为 2~20g/t,均值 5g/t,边界品味为 1.5g/t。金主要以金离子或者金银合金存在黄铁矿当中。

3.2　结果分析

以-470m 中段为例(图 4),取滑动窗口大小 r(r = 1, 2,…,10),用滑动窗口法和周期边界法分别算出的-470m 中段各勘探槽的空隙值,显示结果于图 5。如图可知,当 r 不断增加,空隙值不断减小直到 1。

仔细比较两幅图,它们显示空隙值很相似的趋势,只有勘探槽 363,361,353 和 353w 在两幅图里有少许区别,而这几个勘探槽的品位分布相对来说比较不均一,这与图 3 所显示的结果相吻合,也就是说边界效应在分布不均一的图形上更加明显。

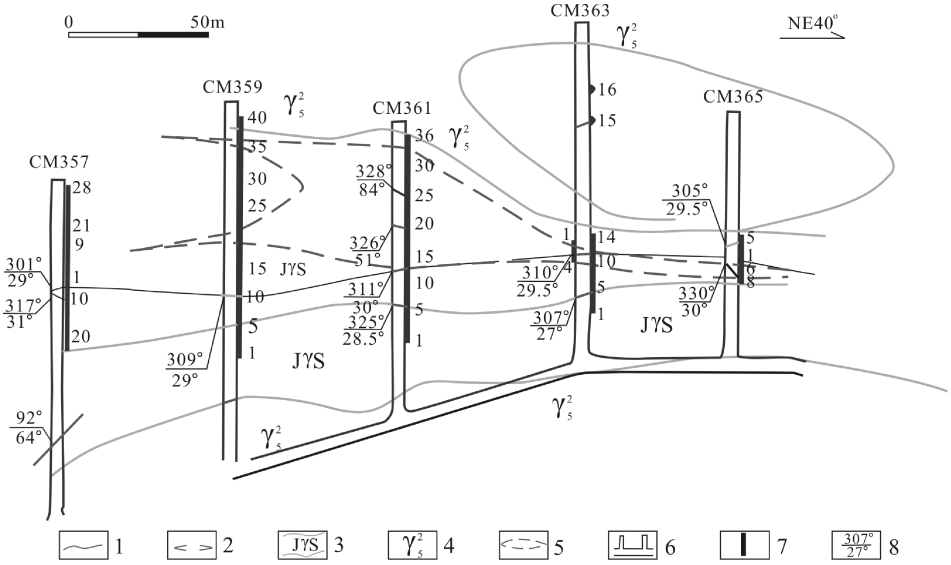

图 4　上庄金矿床-470m 中段剖面图

Fig. 4　Geological section of central section of -470m level in the Shangzhuang deposit

1-主裂面;2-工业矿体;3-玲珑花岗岩;4-郭家岭花岗岩;5-表外矿体; 6-施工巷道;7-探槽取样;8-产状

1-fault; 2-economic orebody; 3-Linglong granite; 4-Guojialing granite; 5-submarginal orebody; 6-tunnel; 7-sampling; 8-attitude

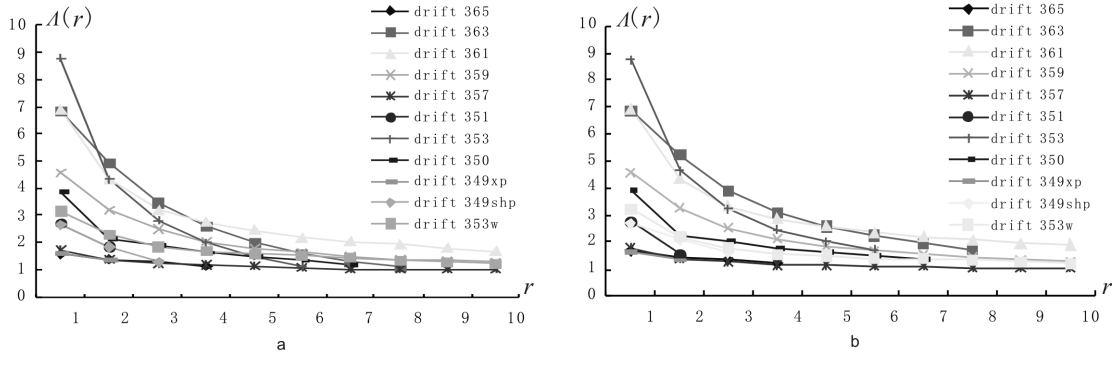

图 5　-470m 各勘探槽的空隙值

Fig. 5　Lacunarity values of all trenches at -470m level

a-用滑动窗口法计算出的-470m 各勘探槽的空隙值;b-用周期边界法计算出的-470m 各勘探槽的空隙值

a-calculated by gliding box algorithm; b-calculated by periodic boundary algorithm

在滑动窗口大小 r 相同的情况下,高空隙值意味着高品位值的更聚集的分布。从以下四幅图(图6)中可以清楚地看出,更高的空隙值意味着高品位更密的聚集,更少的聚集的地方和更小的聚集的宽度。在-470m 中段中,勘探槽 353 的空隙值是最大的(图5(a)),这是由于唯一的极高品位值存在所造成的,局部异常高的品位导致了突然非常聚集的分布,所以空隙值便很大(图 6(a));对于勘探槽 361,它的空隙值也很高,它也是高品位聚集的分布,但是聚集的宽度较大且聚集的品位稍低(图6(b)),是以空隙值没有勘探槽 353 大;而空隙值较低的勘探槽 359 的曲线图明显比前面提到的两个更加平滑,它的分布也就更加均一,三处分开的凸起指示了三处分开的矿化区,也就说明了较低的矿化强度(图6(c));最后,勘探槽 357 的平均品位值是最低的,且分布几乎是完全均一的,在整个范围里较低的品位平均分布,所以没有发育了的矿体(图 6(d))。从另一个角度看,比较空隙值和一个勘探槽的平均品位,它两得排序是一样的。拿勘探槽 359,361 和 353 来说,它们的平均品位和由滑动窗口法算出的 $\Lambda(1)$ 分别是 4.4,4.5,6.8 和 5.8,6.7 和8.7。从某种意义上说,空隙值能够反映一个勘探槽的平均品位。

比较 -500m 中段的勘探槽 355,359,363 和 365,我们得到与上面相似的结果。如果选取相同的窗口大小 $r=1$,勘探槽 355 到 363 和 365 的空隙值是逐渐增加的,同时它们的品位分布由几乎完全均一,小聚集变化到大聚集(勘探槽 363 和 365)(图7),这也指示了它们矿化强度的增大。另外,随着窗口大小 r 的增大,勘探槽 363 的空隙值会超过勘探槽 365 的空隙值,这是由于移动不变性和尺度不变性的复杂结构所造成的。

更高的聚集品位值,更少的聚集次数和更窄的聚集宽度指示了更高的矿化强度。这也就是说,空隙值是一个很好的能综合评价矿化强度的参量。

与同时计算的传统的矿化强度指数 I_c 相比较,空隙值低的勘探槽矿化强度指数也低,且它们的排序也是完全一致的,比如,-470m 中段 357 勘探槽的 $\Lambda(1)=1.77$, $I_c=0.12$;359 勘探槽的 $\Lambda(1)=4.58$, $I_c=0.26$;勘探槽 361 的 $\Lambda(1)=6,89$, $I_c=0.96$;勘探槽 353 的 $\Lambda(1)=8.73$, $I_c=1.55$;说明空隙值确实能十分准确的描述矿化强度。传统的矿化强度指数只是一个值,而空隙法除了了能反映矿化强度以外,对矿体的空间分布也能如实呈现。且空隙值法能用到所有的数据,比传统的矿化强度指数能反映的信息更加完整。

在自相似集里,分维值是一个描述数据分散分布的重要参数,且在一定程度上可以说低分维值表示相对高比例的高品位,也就是说更强的矿化强度。

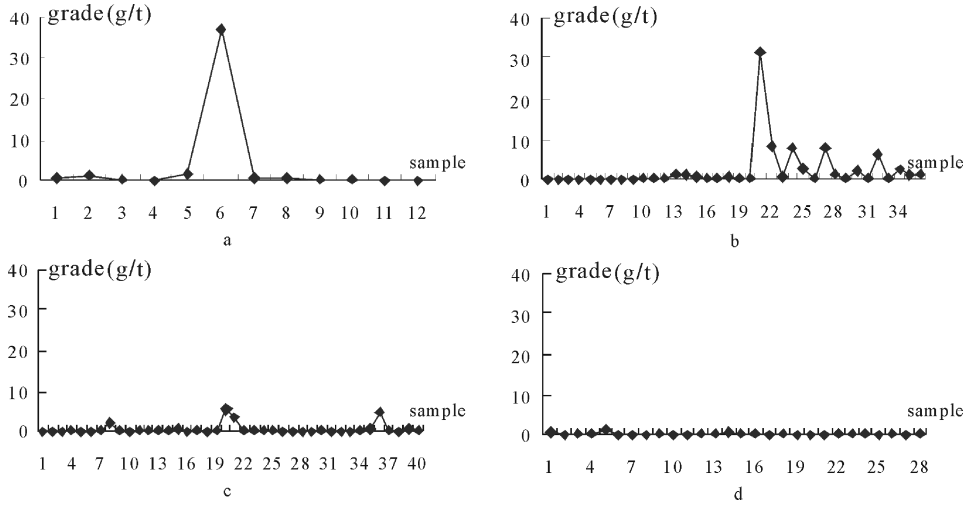

图 6 -470m 中段各勘探槽样品品位分布

Fig. 6 Distribution of sample grades in each trench at -470m level

a-勘探槽 353 样品品位的聚集分布;b-勘探槽 361 样品品位的聚集分布;c-勘探槽 359 样品品位的聚集分布;d-勘探槽 357 样品品位的均一分布

a-clumped distribution of the sample grades on the drift 353; b-clumped distribution of the sample grades on the drift 361; c-slightly clumped distribution of the sample grades on the drift 359; d-near uniform distribution of the sample grades on the drift 357

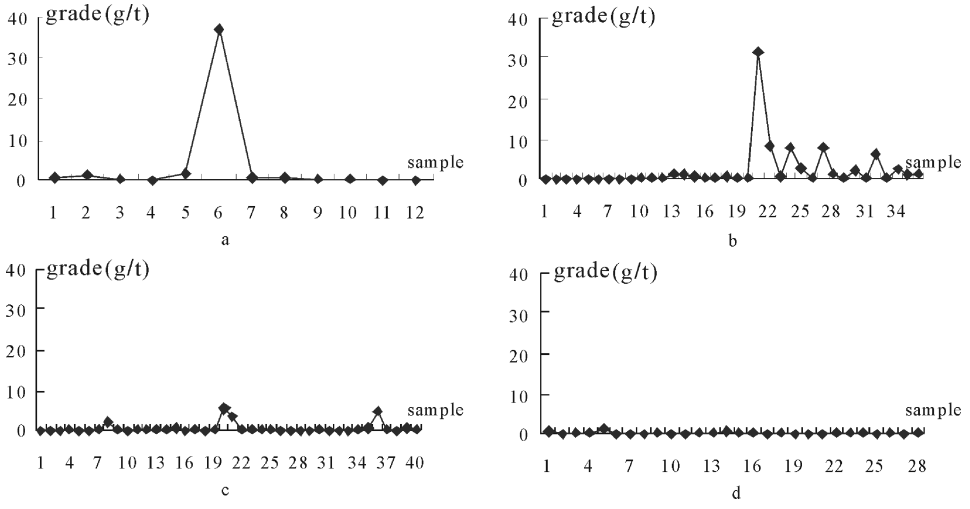

图 7　−500m 中段各勘探槽样品品位分布

Fig. 7　Distribution of the sample grades in each trench at −500m level

a−勘探槽 365 样品品位的聚集分布;b−勘探槽 363 样品品位的聚集分布;c−勘探槽 359 样品品位的均一分布;d−勘探槽 355 样品品位的均一分布

a−the clumped distribution of the sample grades on the drift 365; b−the clumped distribution of the sample grades on the drift 363; c−the near uniform distribution of the sample grades on the drift 359; d−the near uniform distribution of the sample grades on the drift 355

图 8 是大伊格庄金矿各勘探线金品位分布的分维值(D)和 $re=1$ 时的空隙值($\Lambda(1)$)的投点图。从图上可以看出,一般分维值降低,则空隙值,也就是品位聚集的程度增加,图中用长方形框住的都是这样的情况。在这个长方形中,只有 357 号勘探线时分布均一的低品位,于是虽然它的分维值很高但是空隙值却很低,也就是说它的矿化强度低。其它在长方形内的勘探线都是有一些高品位聚集的非均匀分布,也就是相较于勘探线 357 它们的矿化强度都高一些。勘探线 365 是唯一在长方形外的勘探线,它的分维值和空隙值都很低,这是因为它的品位分布是均一的,但是却不是低品位的分布均一,而是高品位的分布均一,于是它的分维值和空隙值都低。而这种情况很少,所以说空隙值仍然是一个很好的指示矿化强度的指标。对于它的缺陷,预测时同时结合其它参数也是必要的(罗周全等,2007;陈聆等,2009)。

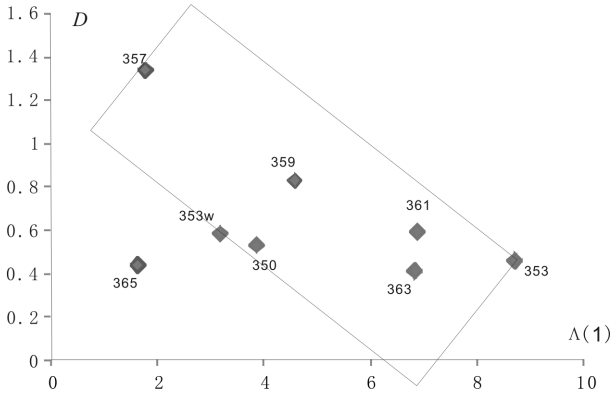

图 8　大伊格庄金矿各勘探线金品位分维值和空隙值的投点图

Fig. 8　Plots of lacunarities of all trenches and fractal dimensions of gold grade distribution along all survey lines in the Shangzhuang gold deposit

4　结论

本文应用空隙法评价了局部矿化强度。研究表明上庄金矿床的矿化强度与它的空隙值所显示的结果高度吻合,说明空隙值是一个很好的反映矿化强度的指标。虽然空隙法不如一些储量预测法准确,比如地块法,但它有十分方便的优势,特别是当数据集十分庞大而复杂且分散在多维空间中时,这时,空隙法能迅速地给采矿一个指导。但在更多的应用上,边界效应需要被考虑,所以与其它方法综合起来运用效果会更好。

致谢:感谢已故导师闫庆旭教授的鼓励,王庆飞老师的细心指导,高晶同学,李昊同学,孙芃同学和刘欢同学的无私帮助。

[References]

Allain C, Cloitre M. 1991. Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets[J]. Physical Review A 44:3552-3558

Chen Ling, Guo Ke, Tang Ju-xing, Huang Hou-hui. 2009. The development and practice of solid mineral resources reserve calculation system based on Kriging Theory by MATLAB Platform[J]. Geology and Exploration, 45(3):287-291

Cheng Q. 1997. Multifractal modeling and lacunarity analysis[J]. Math. Geol, 29:919-932

Cheng Q, Agterberg FP. 1995. Multifractal modeling and spatial point processes[J]. Math. Geology, 27(7):831-845

Cheng Q, Agterberg FP. 1996a. Multifractal modeling and spatial statistics [J]. Math. Geology, 28(1):1-16

Cheng Q, Agterberg FP. 1996b. Comparison between two types of multifractal modeling[J]. Math. Geology, 28(8):1001-1015

Dong P. 2000. Lacunarity for spatial heterogeneity measurement in GIS [J]. Geographic Information, 6(1):20-26

Feagin RA, Wu XB, Feagin T. 2007. Edge effects in lacunarity analysis [J]. Ecological modeling, 201:262-268

Gaylord RJ, Nishidate K. 1996. Modeling Nature: Cellular Automata Simulations with Mathematica[M]. Springer-Verlag, New York:260

Gefen Y, Meir Y, Aharony A. 1983. Geometric implementation of hypercubic lattices with noninteger dimensionality by use of low lacunarity fractal lattices[J]. Physical Review Letters, 50:145-148

Henebry GM, Kux KJH. 1995. Lacunarity as a texture measure for SAR imagery[J]. Int. J. Remote Sens, 16:565-571

Lin B, Yang ZR. 1986. A suggested lacunarity expression for Sierpinski carpets[J]. Journal Physics A: Mathematical and General, 19:49-52

Luo Zhou-quan, Liu Xiao-ming, Wu Ya-bing, Liu Wang-ping, Yang Bi-ao. 2007. Application of geostatistics in polymetallic deposit reserves calculation[J]. Geology and Exploration, (3):83-87

Mandelbrot B. 1995. Measures of fractal lacunarity: Minkowski content and alternatives[J]. Progress in Probability, 37:15-42

Mandelbrot BB. 1983. The fractal geometry of nature[M]. Freeman, San Francisco:468

Plotnick RE, Gardner RH, Hargrove WW, Prestegaard K, Perlmutter M. 1996. Lacunarity analysis: A general technique for the analysis of spatial patterns[J]. Physical Review E, 53:5461-5468

Plotnick RE, Gardner RH, O_Neill RV. 1993. Lacunarity indices as measures of landscape texture[J]. Landscape Ecology, 8:201-211

Turcotte DL. 1997. Fractals and chaos in geology and geophysics[M]. Cambridge University Press:398

Voss R. 1986. Random fractals: characterization and measurement[A]. In R. Pynn & A. Skjeltorp (Eds.), Scaling phenomena in disordered systems[C]. New York: Plenum:1-11

[附中文参考文献]

陈 聆,郭 科,唐菊兴,黄厚辉. 2009. MATLAB 平台下基于克立格理论的固体资源储量估算系统的开发与实践[J]. 地质与勘探, 45(3):287-291

罗周全,刘晓明,吴亚斌,刘望平,杨 彪. 2007. 地质统计学在多金属矿床储量计算中的应用研究[J]. 地质与勘探,(3):83-87

Identification of Mineralization Intensity Using Lacunarity Analysis

ZHAO Jie[1,2,3], WANG Qing-fei[1,2], ZHANG Duo-yu[3]

(1. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083; 2. *Key Laboratory of Lithosphere Tectonics and Lithoprobing Technology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing* 100083; 3. *School of Information and Engineering, China University of Geosciences, Beijing* 100083)

Abstract: The mineralization intensity in the exploration trench is determined by the distribution of the grades, especially the clumpness of the high grades of ore bodies, which can be quantified by the lacunarity method. Taking the Shangzhuang gold ore deposit in the gold mine area in eastern Shandong Province as an example, using the lacunarity method, the spatial distribution of grades in different trenches is studied. The result shows that the low lacunarity value usually reflects a nearly uniform distribution of the grades, whereas the high lacunarity value is associated with a clumped distribution of the high grades beyond the cut-off corresponding to the well developed orebody. The values of the lacunarity generally reflect the degree of the spatial concentration of the high grades and can serve as a potential index for appraisal of the mineralization intensity.

Key words: lacunarity, clumped distribution, eastern Shandong province