

地球化学异常标度不变性与超低密度地球化学填图

施俊法¹, 向运川²

(1. 国土资源部信息中心, 北京 100037; 2. 国土资源部物化探研究所, 廊坊 065000)

[摘 要] 依据区域地球化学数据, 论证了地球化学异常标度不变性的特征。据此, 提出了一种新
勘查战略, 即采用超低密度地球化学测量方法, 迅速掌握全局, 逐步缩小靶区, 快速圈定巨型矿床密集
区。地球化学异常的标度不变性, 为全球地球化学填图计划的实施提供了理论依据。

[关键词] 地球化学异常 标度不变性 勘查战略

[中图分类号] P628, P632 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2000)01-0068-04

所谓标度是指测量单位。标度不变性或无标度性, 就是指所研究的客体与尺度无关, 也就是说对研究的客体进行放大或缩小, 所得客体的形态、复杂程度、不规则性等各种特性均不会发生变化。通俗地说, 如果用放大镜来观察一个客体, 不管放大倍数如何变化, 看到的情形是一样的, 从观测到的图像无法判断所用的放大镜的倍数。具有标度不变性的客体称为分形。一般情况下, 自相似性会有比较复杂的表现形式, 而不一定是局域放大一定倍数以后简单地和整体完全重合, 而且常常称为统计意义上的自相似性。自相似性的特点是通常存在于一定范围内的, 这个范围称为无标度区间。

地球化学异常模式可以很好地归入这种与比例尺无关的现象。浩瀚的数据表明, 地球化学异常模式以各种各样的尺度(规模)存在^[1]。现将这些模式的分类列于表 1 中。

表 1 各种不同规模的地球化学分布模式^[2,3]

线性规模(m)	分布模式实例
10 ⁻⁶	电子探针背散射 X 射线图像显示的微量元素分布
10 ⁻⁶ ~ 10 ⁻²	薄片中的矿物分布
10 ⁻² ~ 10 ²	钻孔中常量元素和微量元素分布
10 ² ~ 10 ³	局部地球化学异常
10 ³ ~ 10 ⁴	区域规模的地球化学异常
10 ⁴ ~ 10 ⁵	地球化学省
10 ⁵ ~ 10 ⁶	地球化学巨省

本文将以水系沉积物测量为基础的区域地球化学数据为研究对象, 查明地球化学异常的标度不变性的特征, 并将这一特性用于指导矿产勘查的区域地球化学测量工作, 提出新矿产勘查战略。

1 区域地球化学异常的标度不变性

为了研究区域地球化学数据的分形特征, 国内

外地球化学家进行了广泛的探索, 先后使用周长—面积分形、岛屿的总数与面积分形模型^[3,4]以及多重分形模型^[4]进行了研究, 证实了地球化学异常分布模式具有分形特征。但由于运算过于复杂, 一般研究人员很难理解其意义。

让我们先来回顾一下 Mandlbrot 研究海岸线分形的思路。Mandlbrot 讨论了英国的海岸线有多长^[5,6]。由于海水的冲刷和陆地的运动, 海岸线是由许多大大小小的海岸组成, 其形状非常不规则。用不同长度的尺子去度量海岸线, 所获得的海岸线的长度 $L(\delta)$ 不同, 由于海岸线存在各种不同的弯曲, 尺子越短, 所得的长度越大。Mandlbrot 认为, 海岸线的长度是不确定的, 即不具特征尺度。研究表明, $L(\delta)$ 与 δ 之间存在下述的关系:

$$L(\delta) = C\delta^{(1-D)} \quad (1)$$

其中, C 为常数, D 为海岸线的分数维。数学上的 Koch 曲线便是一种理想的、规则的海岸线(图 1)。

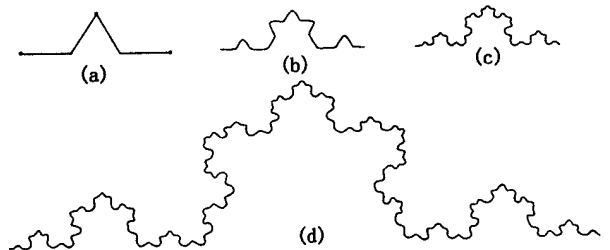


图 1 Koch 曲线

把图(a)缩小 1/3, 用缩小后的图取代原图中的每一线段, 得到图(b), 再把图(b)缩小 1/3, 用缩小后的图取代图(a)每一段, 得到图(c), ……这样无限进行下去, 便得到了 Koch 曲线。

由图 1 可以清楚地看出, 如果 Koch 曲线每迭代一次, 曲线的长度就会有规律地增加。经过无数次迭代便得到了图 1(d)。显然, 图 1(d) 曲线的长度是

[收稿日期] 1998-05-06; [修定日期] 1999-01-21; [责任编辑] 王延忠
[基金项目] 国家自然科学基金(49773205)资助。

无法测定的,无论你用多长的尺子都是无法精确测定其长度,这种现象就是无特征尺度特性的表现。Koch 曲线每一小段都具有图 1(a)的特征,且整体与局部也具有自相似性。依据(1)式,我们便可求得 $D = \ln 3 / \ln 2$ 。从图 1 可以看出,我们对 Koch 经过一定的数次迭代后,其形态就会基本保持不变,尽管在局部细节上会发生微小的改变。

图 2 为典型的地球化学剖面,若将它与图 1 相比较,便可以发现两者之间的相似之处。地球化学异常分布模式是一种不规则的 Koch 曲线,它具有统计分形的特征。由图 1 可知,只要观测点的间距(即取样密度)达到一定程度后,地球化学异常总体是保持不变,只是在局部细节上发生微小的变化。

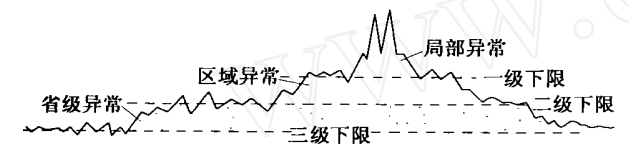


图 2 局部、区域和省地球化学异常分布及其嵌套模式

在 Mandlbrot 的海岸线分形模型的启发下,我们认为既然地球化学异常具有分形特征,那么地球化学分布模式复杂程度与测量所用的比例尺之间会成幂函数的关系。如果地球化学测量的比例尺用长度来表征,那它就好像测量海岸线的步长。为了研究方便,我们从一维地球化学数据(剖面)进行研究。在编制地球化学剖面图时,人们通常将各观测点元

素含量连起来,我们用连线的总长度来表征地球化学异常的复杂程度(图 2)。具体方法如下:

假设我们现有一个足够长的地球化学剖面,各观测点是呈等间距分布的。以第一个点为起点,最后一个点为终点,将这两个点固定不动。第一步,将各观测值按折线连接起来。求得折线的总长度,记为 L_1 ,此时取样点的间距为 δ_1 。第二步,将奇数观测点舍去,再将余下各观测点用折线连起来,然后再求得折线的总长度 L_2 ,而观测点间距变为 δ_2 。事实上, $\delta_2 = \delta_1$ 。依次类推,直至剩下起点和终点为止。最后,作 L 与 δ 双对数图。

由于实际工作难以获得很长的观测剖面,我们只好从 1 20 万区域地球化学数据截取剖面。本次研究的剖面取自内蒙古德布干地区 1 20 万区域化探数据,剖面长度为 180 km,共切过了 10 幅 1 20 万图幅,获得 246 个点,选择了 Au、Ag、Cu、Pb、Zn 5 种元素为研究对象,按照上述思路,获得了各元素的 L 与 δ 的双对数图(图 3)。拟合所得的直线的斜率便可求得维 D 值。由于我国区域化探数据是按 4 km^2 组合成一个样品,因此,在本次研究获得的原始数据中,取样点最小间距为 2 km。考虑到计算方便,我们先将地球化学数据进行空间插值,使得每 km^2 有一个数据点。由于我们所截的剖面是基本上沿方格网的对角线方向截取的,因此,我们所研究的剖面大约 1.4 km 一个数据点。

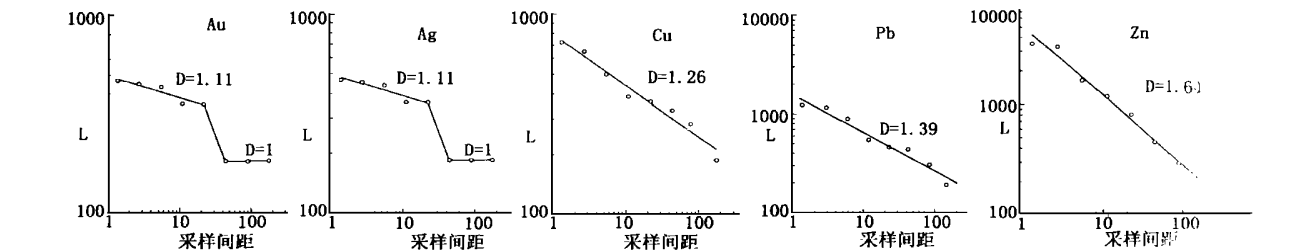


图 3 内蒙古布德干地区元素含量空间分布 (L) 与采样间距 (δ) 的关系

2 结果与讨论

从图 3 可以看出,在 2 km ~ 180 km 范围内,Cu、Pb、Zn 地球化学异常存在标度不变性的特征。依据公式(1)便可求得 D_{Cu} 、 D_{Zn} 、 D_{Pb} 分别为 1.26、1.39、1.64。这说明,在 2 km ~ 180 km 线性范围内,不同取样密度的 Cu、Pb、Zn 地球化学异常具有自相似性。元素含量空间各点分布的连线 L ,具有无特征测度的特性,也就是说, L 的大小与所用比例尺(取样间距)有关。

从图 3 可以看出,在 2 km ~ 22.5 km 范围内,

Au、Ag 地球化学异常也存在标度不变性,两者的 D 值都为 1.11。在 45 km ~ 180 km 的无标度区间内,Au 和 Ag 的 D 值接近于 1。这可能说明,在 2 km ~ 22.5 km 的取样区间内,不同取样网度的 Au、Ag 地球化学异常具有自相似性。当取样间距大于 22.5 km 时,地球化学异常不再具有标度不变性的特征(或者落在另一个标度不变性的范围)。22.5 km 线性尺度正是金的区域地球化学异常至地球化学省的线性尺度。取样密度不低于 $(22.5 \times 22.5) \text{ km}^2$,即大约 500 km^2 一个样品,这样便能保证不会漏掉金的区域地球化学异常或金的地球化学省。

由于受资料的限制,我们还未能对我国区域化探扫面数据进行大规模的抽稀试验。但值得一提的是,谢学锦院士提出了泛滥平原沉积物为取样介质,于1993年~1994年在全国采集了529余件泛滥平原沉积物样品,将这些结果与区域化探全国扫面计划所采集的数万个样品的分析结果比较,一些元素平均值及其分布趋势都非常一致。其中Cu的地球化学分布模式表现最为显著^[7]。但对于Au而言,泛滥平原沉积物的地球化学分布模式与区域化探全国扫面计划的地球化学分布模式相对差异较大。这很可能与我们这里讨论的Au地球化学标度不变性范围有关,也就是说,其取样密度过稀,已不能保证地球化学异常的相似性。

由公式(1)可知, D 值是反映元素空间分布复杂程度与取样间距变化关系的重要指标。 D 值越小($1-D$ 值越大),元素含量在空间分布起伏越大。其中 D_{Au} 、 D_{Ag} 值最小,且两者相等,这是很容易理解的。因为Au、Ag具有空间分布极不均一的特性,含量变化起伏大,且两者具有相似的地球化学性质。因此,我们认为 D 值是元素含空间不均一分布的重要指标,它除了受元素本身的地球化学特性影响外,还受区域控矿因素影响。对于 D 值的地质地球化学意义及其影响因素(如不同景观区条件、表生作用等),还有待于深入研究。

地球化学异常的标度不变性表明,不同取样密度的地球化学异常之间具有自相似性,无论你用多大的取样密度也无法准确勾画地球化学异常。因此,区域地球化学测量的取样密度的大小完全取决于你要描绘的对象的大小。对于战略性普查来说,400 km²~500 km²取一个样品是可行的。用超低密度地球化学测量方法,可以快速地掌握全局,确定区域成矿带的地球化学异常特征,然后在具有远景的靶区进一步深入研究,使勘查靶区逐渐缩小,从而逐步逼近矿床(图4)。需要指出的是,我们并不是说直接用1/(400 km²~500 km²)的取样结果来直接找矿,而依据这种地球化学测量结果,在异常区加密取样,一步步地逼近矿床。这种思路比起一开始就将目标集中矿床上,其成本效益要高得多。

在国际地球化学填图计划(IGCP259和IGCP360)中,勘查地球化学家提出按160 km×160 km网格,用5000~6000个样品覆盖全球,以期获得全球地球化学图集。然而,这种思路遭到了众多地质学家的反对,地质学家担心这种甚低密度的地球化学方法,能否保证地球化学异常与地质特征的符

合,能否把握全球地球化学异常的总体特征。按照地球化学异常标度不变性的原理,在2 km~180 km范围内多数元素在不同尺度下具有自相似性的特征。因此,我们认为这种思路是可行的。

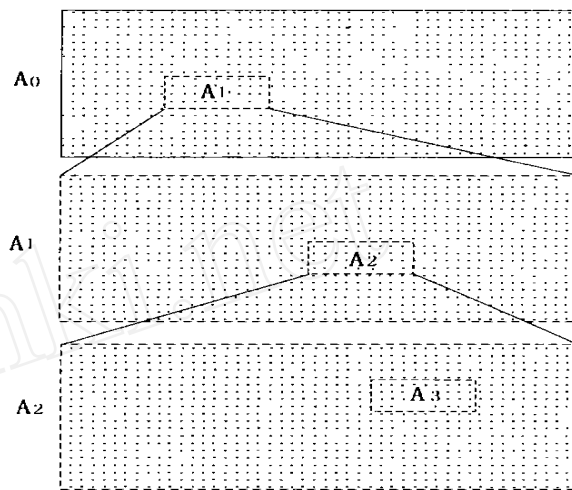


图4 迅速掌握全局,逐步缩小靶区的找矿战略示意图
先在初始大测区(A_0)超低密度取样,然后逐步增加异常(A_1 、 A_2 、 A_3)的取样密度(据Bolvikén,1993)

3 结论

1)从地球化学图和其他经验数据表明,许多元素从微观到大陆范围内都存在重要的地球化学异常模式,这指示着地球化学异常模式具有标度不变性的特征。

2)依据内蒙古的区域化探数据,揭示出了元素分布的标度不变性特征。Cu、Pb、Zn分维 D 值在1.23~1.64之间,而Au、Ag的分维值为1.11。分维 D 值是刻画元素空间分布复杂程度的标志,它与元素本身的地球化学性质密切相关。

3)地球化学异常的标度不变性是区域地球化学测量的理论基础。迅速掌握全局,逐步缩小靶区的超低密度地球化学勘查战略,适用于我国西部地区快速寻找潜在的大型、超大型矿床。

4)地球化学异常标度不变性,也为国际地球化学填图计划的实施提供理论依据。

[参考文献]

- [1] 施俊法. 地球化学现象的分形特性及其意义[J]. 国外地质勘探技术,1996(3):16~20.
- [2] Xie X, Yin B. Geochemical patterns from local to global[J]. J Geochem Explor, 1993(47):109~129.
- [3] Bolvikén B, Stokke P R, Feder J et al. the fractal nature geochemical landscapes[J]. J Geochemical Exploration, 1992, 43:91~109.

(下转第74页)

工具。只有应用了空间分析的方法,才有可能对化探异常的找矿有利度进行定量的、全面的分析。因此,可以说只有出现了 GIS 才有经验找矿与求异找矿的结合。

3)找矿有利度、矿产地与异常的耦合度、矿床出现率、异常间的空间相关系数等参数将是对异常在预测找矿中的作用进行定量评价时的重要参数。文中对不同元素异常、同一种类元素不同级别异常及两种不同元素组合异常的找矿有利度分析方法,可以作为异常分析的一种有效方法加以应用。

[参考文献]

[1] 沃林 O N. 进入下个世纪的矿产勘查[J]. 地质矿产信息, 1997,

17, 11 ~ 14.

[2] 池顺都,周顺平,吴新林. GIS 支持下的地质异常分析及金属矿产经验预测[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1997, 22 (1): 99 ~ 103.

[3] 赵鹏大,池顺都. 当今矿产勘查问题的思考[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1998, 23 (1): 70 ~ 74.

[4] 赵鹏大,池顺都,陈永清. 查明地质异常:成矿预测的基础[J]. 高校地质学报, 1996, 4: 361 ~ 373.

[5] 池顺都,吴新林. 云南元江地区铜矿 GIS 预测时的找矿有利度和空间相关性分析[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1998, 23 (1): 75 ~ 78.

[6] 池顺都,赵鹏大. 应用 GIS 圈定找矿可行地段和有利地段[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1998, 23 (2): 125 ~ 128.

NEW TREND OF GEOCHEMICAL EXPLORATION: GIS—A COMBINATION TOOL OF PROSPECTING BY EXPERIENCE WITH THAT BY ANOMALY

CHI Shun - du

Abstract :Mineral prospecting by experience and that by anomaly will be the two important methods for mineral prospecting in the next century. The GIS technology can be used to study the coupling degree and the occurrence number of the geochemical anomalies and their related deposits. It can also be used to study the favorable degree for mineral prospecting of the anomalies of different elements, the anomalies of different grades of the same elements and the combination of two different elements. It is approved that the combination of the two methods could greatly improve the effects of mineral prospecting.

Key words :GIS, prediction of mineral resources, geochemical anomaly

第一作者简介:



池顺都(1941 年 -),男。1965 年毕业于浙江大学地质系,1982 年在北京地质学院北京研究生部获硕士学位。现任中国地质大学资源学院教授。主要从事矿产勘查学和数学地质的教学和科学研究。

通讯地址:湖北省武汉市鲁磨路 中国地质大学资源学院 邮政编码:430074

(上接第 70 页)

[4] Cheng Q, Agterberg F P, Ballantyne S B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal method[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58 (2): 109 ~ 130.

[5] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain, statistical self-similarity and fractional dimension[J]. science, 1967, 43 (2): 91 ~ 109.

[6] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. W. H. Freeman,

New York, 1983.

[7] Darnley A G et al. A global geochemical database for environmental and resource management (Final report of IGCP Project 259) [C], 1995.

[8] 谢学锦. 勘查地球化学的现状与未来展望[J]. 地质论评, 1996, 42 (4): 346 ~ 356.

THE SCALE INVARIANCE OF GEOCHEMICAL ANOMALIES AND WIDE- SPACED GEOCHEMICAL MAPPING

SHI Jun - fa, XIAN Yun - chuan

Abstract :The Scale Invariance of Geochemical Anomalies has been discussed. The scale invariance of regional geochemical anomalies has been tested by the relation between the yardstick and the length of the coast. Therefore, the approach from strategic reconnaissance for reducing targets to tactical surveying to pinpoint drill site will be carried out by ultra - low density geochemical survey and the concentrated areas of the giant deposits will be rapidly delineated. The scale invariance of geochemical anomalies is the theoretical basis of the international geochemical mapping.

Key words :geochemical anomalies scale invariance exploration strategy

第一作者简介:



施俊法(1964 年 -),男。1989 年毕业于中国地质大学(北京)地球化学专业,获硕士学位。现为国土资源部信息中心研究员。从事非线性理论在地球化学中的应用研究。

通讯地址:北京市阜外大街 45 号 国土资源部信息中心 邮政编码:100037